

Б. Г. КУЗНЕЦОВ

Принцип дополнительности



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Б. Г. Кузнецов

ПРИНЦИП
ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1968

В книге рассматривается идея дополнительности, выдвинутая Нильсом Бором для обоснования наиболее общих принципов квантовой механики, аналоги этой идеи в античной и в классической физике, пути дальнейшего обобщения этой идеи, а также возможность ее применения вне физики. Книга рассчитана на широкий круг читателей, знакомых с самыми элементарными понятиями теории относительности и квантовой механики.

1. Дополнительность в нерелятивистской квантовой механике

Весной 1926 г. Вернер Гейзенберг приехал из Геттингена в Копенгаген. Непосредственно перед этим он пришел к новым идеям, означавшим по существу появление новой, квантовой механики. Ей были посвящены совместные исследования Гейзенберга, Макса Борна и Паскуаля Йордана в течение зимы 1925—1926 г. В это же время независимо от геттингенских ученых Поль Дирак разрабатывал в Кембридже свой вариант квантовой механики. Уже существовало и другое направление, которое пока казалось независимым от квантовой механики — волновая механика. Исходные идеи волновой механики были выдвинуты в 1924 г. Луи де Бройлем, а сравнительно законченный вид она приобрела в работах Эрвина Шредингера, появившихся в 1926 г.

Приехав в Копенгаген, Гейзенберг ежедневно встречался с Нильсом Бором и обсуждал варианты волновой и квантовой механики, к которым в то время уже было приковано внимание физиков-теоретиков во всем мире. Чтобы перейти к содержанию бесед и споров Гейзенберга и Бора, нужно дать некоторое представление о смысле новых идей — о том главном, что содержалось в статьях, опубликованных в 1924—1926 гг. и положивших начало новой эпохе в физике.

Летом 1923 г. де Бройль, готовясь к защите докторской диссертации, сформулировал в небольшой статье ее основные мысли. Статья была напечатана осенью 1923 г. в Докладах Парижской академии наук. В следующем году де Бройль защитил диссертацию и в 1925 г. опубликовал ее.

Де Бройль предположил, что электрон обладает волновыми свойствами. Движению частицы соответствует неко-

торый волновой процесс, происходящее с известной скоростью распространение колебаний. Этот волновой процесс характеризуется частотой колебаний — чисто волновой величиной. Она соответствует энергии частицы — чисто корпускулярной величине. В том же году, когда была напечатана диссертация де Бройля, Шредингер придал созданной де Бройлем волновой механике очень стройную математическую форму. В статье, опубликованной в самом начале 1926 г., Шредингер предложил волновое уравнение, которое позволяет вычислить для каждой точки пространства в каждый момент времени значение некоторой колеблющейся величины — волновой функции и узнать таким образом амплитуду и частоту ее колебаний. Волновая функция определяет динамические переменные электрона, в частности его энергию, причем, что очень важно, получается дискретный ряд значений энергии: подчиняясь в своем поведении волновому уравнению, частица может иметь только определенные значения энергии, отличающиеся одно от другого конечным приращением. Такой результат позволил ответить на нерешенный в то время вопрос: почему электрон, обращаясь в атоме вокруг ядра, может находиться лишь на дискретных орбитах и соответственно обладать лишь дискретными уровнями энергии.

Шредингер был склонен отказаться от дискретной картины мира, свести его природу к волнам в континуальной среде, наподобие обычных волн на поверхности воды или электромагнитных волн. Существование электронов он хотел представить как вторичное явление, как результат волнового процесса.

Несколько раньше упомянутой статьи Шредингера, в конце 1925 г., появилась статья Гейзенберга, в которой дискретность уровней энергии выводилась из корпускулярных свойств электрона. Но в число этих свойств не входили определенное положение и определенный импульс электрона. Гейзенберг характеризует движение электрона по орбите не его положением и импульсом в каждой точке, а энергетическими уровнями атома и спектральными линиями излучения атома. Такое представление получило ясную математическую форму в совместной статье Гейзенберга, Борна и Иордана. Летом 1925 г. в Кембридже Гейзенберг рассказал о своих идеях, выступив в лаборатории П. Л. Капицы. Здесь, в Кембридже, в разработку новой квантовой механики включился 23-летний студент Поль

Дирак, применивший еще более изящные математические приемы.

В столь богатом событиями 1926 г. Борн высказал очень оригинальную идею, связавшую волновую функцию, — колеблющуюся величину, амплитуда которой определяется уравнением Шредингера, — с корпускулярными понятиями — энергией и импульсом частицы, ее координатами и временем, когда частица обладает данными значениями энергии и импульса и данным положением в пространстве. Оказывается, амплитуда волновой функции (квадрат модуля амплитуды) — это мера вероятности нахождения частицы в данной точке пространства, в данный момент времени, вероятность некоторой пространственно-временной локализации частицы. Мысль Борна означала серьезный перелом в характере научного мышления. В классической науке пребывание частицы в некоторой точке в некоторый момент — это и есть исходное, элементарное событие; из таких событий складываются состояние и эволюция Вселенной. Оказывается, фундаментальными законами природы определяются не эти события, а только их вероятности.

Как же перейти от *волн вероятности*, от волн де Бройля, которые оказались распространяющейся мерой вероятности, от волнового уравнения Шредингера, которое выражает вероятностные законы бытия, к достоверным и определенным сведениям о пространственно-временной локализации частицы?

Классический путь перехода от вероятностей к достоверным значениям состоит в большом числе *испытаний*. Когда бросают монету, известные нам закономерности (если множество таких воздействий на монету, как различия в плотности воздуха, вариации первоначального толчка и т. д., неизвестны или игнорируются) определяют лишь вероятность выпадения герба или решки. Вероятность каждого выпадения равна половине. При большом числе испытаний число выпадений герба будет близко половине числа испытаний, и число выпадений решки — также половине. Такой результат практически достоверен.

Но есть и другой способ получения достоверных значений. Он связан не с множеством испытаний, а с единичным экспериментом, в котором процесс ставится в такие условия, когда он дает достоверный результат. Представим себе поток электронов, движущихся в пространстве по направ-

лениям, о которых нам известна лишь вероятность каждого направления. Нам известна также лишь вероятность положения электронов в каждый момент. Пусть на пути электронов находится диафрагма с очень малым отверстием. Если электрон проходит через это отверстие, мы можем достоверно судить о положении электрона в момент прохождения.

В 1926 г. Гейзенберг задумывался о таком пути перехода к достоверным и определенным сведениям о локализации частицы. У него появилось соображение о воздействии процесса измерения на положение и импульс электрона. Чтобы познакомиться с этими соображениями, следует забежать немного вперед и кратко сформулировать вывод, изложенный Гейзенбергом в 1927 г.

Вывод состоял в невозможности получить в одном эксперименте достоверные сведения и о положении и об импульсе частицы. Такая невозможность иллюстрируется множеством мысленных экспериментов, в каждом из которых фигурирует прибор типа диафрагмы с очень малым (в принципе сколь угодно малым) отверстием — такой прибор позволяет измерить положение проходящего сквозь отверстие электрона, и наряду с ним прибор типа диафрагмы с легкой дверцей, воспринимающей импульс проходящего через диафрагму электрона и позволяющей измерить этот импульс.

Гейзенберг рассматривает измерение динамических переменных частицы как взаимодействие частицы с прибором. Это взаимодействие имеет физический смысл, если оно вызывает изменение состояния взаимодействующих тел. Мы приписываем отверстию в диафрагме точное и определенное положение. Но, измеряя положение частицы, проходящей сквозь такое очень малое отверстие, диафрагма меняет ее импульс. Если же перед нами диафрагма с дверцей, то прибор, измеряя импульс частицы, не дает возможности точно зафиксировать ее положение. В первом случае неустранима неопределенность импульса. Во втором случае неопределенным остается положение частицы, его неопределенность — цена определенности импульса.

На основе аналогичных соображений, появившихся у Гейзенберга в 1926 г., он сформулировал известный *принцип неопределенности*. Согласно этому принципу точность определения координаты частицы и точность определения

соответствующей компоненты ее импульса обратно пропорциональны. Если взять средние квадраты отклонений (квадраты — потому что сами отклонения в разные стороны при усреднении погашаются и дают нуль, а их квадраты всегда положительны), т. е. меры неточности при измерении координаты и соответствующей компоненты импульса, то произведение этих величин дает постоянную величину, выражающуюся через найденное в 1900 г. Максом Планком минимальное, далее неделимое значение действия, так называемую постоянную Планка. Впоследствии оказалось, что аналогичное соотношение неточностей связывает определение времени и определение энергии частицы в этот момент.

Сопоставим определение пространственного положения и времени, с одной стороны, и определение импульса и энергии — с другой. Как известно, Герман Минковский, излагая теорию относительности Эйнштейна в форме четырехмерной геометрии, ввел понятие *мировой точки* — трех пространственных координат и четвертой координаты, измеряющей особыми единицами время. Определение пространственно-переменной локализации частицы, это определение мировой точки, в которой она находится. Для Эйнштейна такое определение не имеет смысла, если нет тела отсчета. Совпадение положения частицы с каким-то делением на линейке в момент, совпадающий с каким-то показанием часов, придает смысл пространственно-временной локализации. Презумпция теории относительности — существование таких тел отсчета, которые в принципе можно продолжить и таким образом измерить координаты движущейся частицы¹. Измеряя пространственные координаты частицы и ее временную координату — время ее движения начиная с начального пункта, — можно представить движение частицы как непрерывный ряд мировых точек, как *мировую линию*. Структура мира — это каркас мировых линий частиц.

Теория относительности утверждает, что определение пространственно-временной локализации частицы, определение ее мировой точки, теряет физический смысл, если нет тел отсчета. Принцип неопределенности идет дальше. Он придает пространственно-временной локализации физический смысл, если существует тело взаимодействия,

¹ См.: А. Эйнштейн. О специальной и общей теории относительности. Собрание научных трудов, т. I. М., «Наука», 1965, стр. 533—534.

если определение локализации состоит во взаимодействии и сопровождается изменением энергии и импульса частиц, в чем и выражается взаимодействие. К этой проблеме — связи между взаимодействием, как его рассматривает квантовая физика, и физической содержательностью понятий положения в пространстве и во времени, импульса и энергии — нам придется вернуться еще не раз. А теперь вернемся к генезису принципа дополнительности.

Статья Гейзенберга с изложением принципа неопределенности сопровождалась небольшим послесловием, где Гейзенберг сообщал о замечаниях Бора, ознакомившегося с рукописью статьи. Бор обратил внимание Гейзенберга на «...неопределенность наблюдения, непосредственно связанную с требованием одновременного ответа на различные вопросы, из которых одни имеют смысл в корпускулярной теории, а другие — в волновой».

Это замечание было результатом ежедневных бесед Гейзенберга с Бором весной 1926 г. в Копенгагене. Бор не был согласен ни с континуально-волновой позицией Шредингера, ни с чисто корпускулярной позицией Гейзенберга. Для него исходным пунктом анализа была парадоксальная неотделимость двух аспектов, которые в классической физике исключали друг друга. В спорах с Гейзенбергом Бор стремился вывести соотношение неопределенностей положения частицы и ее импульса из неразрывности волнового и корпускулярного аспектов. В этих спорах и рождалось представление о дополнительности двух аспектов — тот принцип дополнительности, который был выдвинут Бором в 1927 г.

Сейчас связь принципа неопределенности с принципом дополнительности иллюстрируется с помощью уже отчасти известных нам простых мысленных опытов, в которых фигурируют классические объекты, освобожденные от квантовой детализации, от учета их дискретной структуры и волновых свойств составляющих эти тела частиц. Такими классическими объектами являются упоминавшаяся выше неподвижная диафрагма с отверстием, позволяющим определить положение электрона в момент, когда он проникает через отверстие, и диафрагма с дверцей, отклонение которой позволяет измерить импульс электрона.

Но положение частицы является физическим понятием, если речь идет не только о значениях трех координат, т. е. о геометрической локализации частицы. Положение

характеризует физическое событие; речь идет о пространственной локализации такого события, если частица не только пребывает в точке, но отмечает свое пребывание взаимодействием с другими частицами, если она обменивается импульсами с другими телами. В этом случае частица уже не будет псевдонимом точки в пространстве, она обретает свойства, отличающие ее от такой точки, она становится не геометрическим понятием, а физическим объектом. Но определение координат этого объекта требует, чтобы частица взаимодействовала с прибором, обладающим достаточно известными и не меняющимися при взаимодействии координатами той точки, где происходит встреча частицы с прибором. Такой недвижимый при взаимодействии прибор уже не может измерить интенсивность испытываемого им воздействия со стороны частицы, т. е. ее импульс. Как уже говорилось, импульс частицы при взаимодействии с подобным прибором изменяется без какой-либо возможности измерить это изменение и судить об импульсе частицы в момент встречи с прибором. Когда частица проходит через отверстие в диафрагме, воздействие краев отверстия выражается в изменении волновых свойств частицы, в изменении фронта волны. С точки зрения концепции Борна это значит, что наиболее вероятная траектория электрона изменится, наиболее вероятная скорость его будет иной. Речь идет именно о вероятности, мы можем судить о судьбе электрона только по воздействию прохождения через отверстие в диафрагме на направление волны, а волна означает вероятность того или иного импульса электрона, характеризующего его дальнейшую участь. Что же касается точного определения, выходящего за пределы вероятностной информации, полученной при анализе волновой картины движения частицы, то такое определение мы получили для *положения* электрона в момент проникновения через диафрагму и именно такое определение сделало точное и однозначное значение *импульса* электрона неопределимым.

Дополнительность волнового представления по отношению к корпускулярному приводит, следовательно, к тому, что, зная положение частицы с большой точностью (т. е. пропуская частицу через очень узкое отверстие в диафрагме) и нуждаясь в определении импульса частицы (без этого и положение частицы не будет ее *физической* характеристикой, не будет характеристикой физического

события), мы должны ограничиться неточным ответом. В свою очередь прибор, точно регистрирующий импульс частицы при прохождении сквозь диафрагму, заставляет нас судить о ее положении в этот момент только неопределенно.

Такое же соотношение, какое существует между положением и импульсом частицы, как уже говорилось, имеет место между измерением времени и измерением энергии. Более сложные мысленные эксперименты, включающие часы и элементы прибора, измеряющие энергию, убеждают нас в обратной пропорциональности, связывающей точность измерения времени и точность измерения энергии.

Вспомним, что мы уже объединили определение пространственного положения и времени одним понятием пространственно-временной локализации, т. е. определения мировой точки частицы. Объединим также измерение импульса и энергии понятием определения импульсно-энергетических характеристик частицы. Мы можем теперь говорить о квантовой конкретизации понятия тела отсчета, фигурирующего в теории относительности. Измерение пространственных координат и времени приобрело несколько более физический характер, когда предпосылкой такого измерения стали упоминавшиеся выше системы перекрещивающихся линеек, которые можно в принципе продолжить как угодно далеко, и часов, которые могут быть помещены возле каждого деления линеек и синхронизированы.

Такое идеальное тело пространственно-временного отсчета дополняется более сложным понятием; в квантовой механике фигурирует тело *взаимодействия*.

Измерение пространственных и временных координат приобретает в этом случае еще более отчетливый характер физического процесса. Это измерение должно быть взаимодействием измеряемого тела и тела отсчета. Взаимодействие проявляется в неконтролируемом воздействии макроскопической пространственно-временной системы отсчета на импульсно-энергетические характеристики локализуемой частицы. Локализация частицы, определение ее мировой точки при таких условиях оказывают неконтролируемое воздействие на импульсно-энергетическую характеристику частицы. Такая характеристика и превращает геометрическую (хотя бы и четырехмерную) локализацию частицы в собственно физическое событие.

Но импульсно-энергетическая характеристика не может быть однозначной в случае однозначной локализации и, наоборот, локализация будет неоднозначной, если однозначно установлена пространственно-временная локализация. Две компоненты пребывания частицы в мировой точке как физического события связаны соотношением неопределенностей.

Принцип неопределенности ограничивает *корпускулярное* представление о переменных *частицы*. Напротив, принцип дополнительности не выделяет ни одну из сторон корпускулярно-волнового дуализма; он характеризует и волновое представление (оно физически бессодержательно без корпускулярного) и корпускулярное (оно бессодержательно без волнового). Оба представления здесь симметричны. Принцип неопределенности — это применение более общего принципа дополнительности к сравнительно конкретной проблеме измерения классических динамических переменных — положения, времени, импульса и энергии — в случае частиц, обладающих в существенной мере волновыми свойствами.

Сейчас мы подойдем к понятиям дополнительности и неопределенности несколько с другой стороны — со стороны соотношения классических и квантовых понятий.

В квантовой механике специфические антиклассические идеи, негативные по отношению к классическим представлениям, теряют смысл без этих отрицаемых ими классических представлений¹.

Эта специфическая черта квантовой механики связана с разграничением в эксперименте двух его частей: 1) процессов и объектов, к которым мы подходим без квантовой детализации, без учета корпускулярно-волнового дуализма, игнорируя их собственную неопределенность, и 2) квантовых процессов и объектов, где классические понятия непосредственно неприменимы, где мы не можем приписать частице определенных корпускулярных свойств. Первая сторона эксперимента — это прибор, классический объект, тело взаимодействия с гарантированным точным положением составляющих его частиц. Вторая сторона —

¹ См.: Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика, т. III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., Физматгиз, 1963, стр. 14—15.

объект измерения, частица, по отношению к которой нельзя закрывать глаза на ее неклассический характер¹.

Если бы классический объект — прибор, тело взаимодействия — позволил определить и локализацию квантового объекта, т. е. рассматриваемой частицы, и ее импульсно-энергетические свойства, он потерял бы основную функцию, приписываемую ему квантовой механикой. Действительно, классический объект — условие присвоения частице определенной локализации. Например, отверстие в диафрагме, которому мы приписываем вполне определенные координаты, — условие физической содержательности понятия положения, которое присваивается частице. Физическая содержательность, как нам уже известно, означает, что движение частицы отличается от описывающей его мировой линии, пребывание частицы в мировой точке — ее пространственно-временное положение — отличается от мировой точки как от геометрического понятия, является событием в физическом смысле. Аттестатом физической содержательности, событием, несводимым к локализации частицы, как раз и является ее взаимодействие с классическим объектом, включающее не только воздействие частицы на классический объект (по определению последнего такое воздействие контролируется и регистрируется с любой точностью), но и воздействие классического объекта на частицу, воздействие, которое не может быть проконтролировано и измерено.

Принципиальная нерегистрируемость воздействия классического объекта на частицу связана с существованием наименьшей величины действия, с дискретностью действия, с уже упоминавшейся постоянной Планка. Мы приписали классическому телу взаимодействия, классическому объекту, измеряющему положение частицы, непрерывность: мы игнорируем тот факт, что классический объект сам состоит из движущихся частиц. Когда мы говорим о все меньшем отверстии в диафрагме, мы предполагаем, что диафрагма непрерывна на всё меньших и меньших пространственных расстояниях. Чем дальше мы идем в подобном игнорировании дискретной структуры

¹ Разделение процесса измерения на классическую часть (прибор) и неклассический объект очень хорошо разъясняет Гейзенберг в лекции, прочитанной в Венском университете в ноябре 1935 г. (См. русск. перевод: «Принципиальные вопросы современной физики» в кн.: В. Гейзенберг. Философские вопросы современной физики. М., 1953, стр. 42—45).

прибора при измерении положения нашей квантовой частицы, чем большим становится наш классический либерализм по отношению к его предполагаемой способности измерять все точнее и точнее положение испытуемого квантового объекта, тем сильнее его воздействие на импульс этого квантового объекта, на импульс частицы, положение которой нам надо определить.

Произведение пространственного отрезка на импульс не может быть меньше постоянной Планка — кванта действия. Мы допустили, что диафрагма непрерывна на весьма малом отрезке. Таким образом, диафрагма может быть разделена на очень большое число элементов, т. е. положение движущейся частицы может быть определено с очень большой точностью (отверстие в диафрагме очень малое). Тогда воздействие на импульс частицы, на второй множитель, входящий в постоянную Планка, становится весьма неопределенным. Классический либерализм по отношению к способности прибора точно измерять положения оборачивается невозможностью определить с его помощью импульс частицы. В случае диафрагмы с отверстием классический либерализм состоит в предположении, что отверстие может быть неограниченно малым. Слова «либерализм оборачивается невозможностью определить импульс» в этом случае означают, что сколь угодно малое отверстие может сколь угодно менять импульс частицы, и мы не сможем определить меру такого изменения, потому что оно произойдет в пределах кванта действия.

Презумпция классического объекта — то, что мы называли классическим либерализмом — позволяет нам нарушить дискретность действия по отношению к одной из сопряженных величин, к одному множителю кванта действия, по отношению к пространству, но тем самым увеличивается неопределенность другого множителя — импульса частицы. Таким образом, сохраняется невозможность дробления произведения — дискретность действия. Классический либерализм в рамках принципа неопределенности согласуется с основой квантовой физики — открытием Планка. Согласуется в том случае, когда мы приписываем прибору способность сколь угодно точной регистрации положения частицы. Согласуется и тогда, когда перед нами прибор, которому мы в порядке классического «импульсного» либерализма припишем способность со сколь угодно большой точностью регистрировать импульс частицы.

Аналогичным образом можно представить соотношение неточностей определения времени и энергии, произведение которых также имеет размерность действия.

Положение частицы и другие корпускулярные понятия являются необходимой классической презумпцией представления о волнах вероятности. Такое представление связывает волновую концепцию с корпускулярной. Вероятность, фигурирующая в концепции Борна, это вероятность определенного положения частицы. Если мы приписываем частице определенное положение, то квантовая механика предупреждает нас: об этом определенном положении мы можем в общем случае узнать только одно — насколько оно вероятно. Если же мы сразу говорим о вероятности, а не об однозначно определенном значении координаты, то ответ будет таков: об этом вероятном значении можно получить достоверную информацию; уравнение Шредингера дает точный ответ на вопрос о вероятности события и неточный ответ на вопрос о самом событии.

Подойдем теперь к соотношению вероятности и достоверности с другой стороны корпускулярно-волновой коллизии. В результате эксперимента мы получаем в предельном случае достоверную информацию об одной из динамических переменных за счет неопределенности другой переменной. Но это дает возможность говорить о физической содержательности классического понятия положения применительно к квантовому объекту. Тем самым и понятие вероятности положения приобретает физический смысл: речь идет о вероятности события, которое в принципе может быть экспериментально обнаружено.

Следовательно, дополнительность волнового представления (точная информация о вероятных значениях динамических переменных) и корпускулярного представления (точная информация о классической ситуации в отношении данной переменной за счет неточной информации о другой переменной) является в пределах квантовой механики дополнительностью классических понятий и квантового отрицания этих понятий, причем само понятие «дополнительность» означает, что каждый из дополнительных аспектов теряет без другого физический смысл.

Будем рассматривать такое определение понятия «дополнительность» как исходное. Оно покрывает дополни-

тельность корпускулярного и волнового аспектов. Мы видели, что с ней связана дополнительность классических и неклассических понятий — они порознь теряют в квантовой механике физический смысл. И корпускулярно-волновая дополнительность, и классически-неклассическая дополнительность специфичны для квантовой механики. Но мы можем обнаружить здесь и более общее определение. Фигурирующее в квантовой механике тело взаимодействия называют классическим прибором. Какой общий постулат оказывается достаточно точным для характеристики классического прибора? Это — постулат классической науки, который обычно считается основным для нее: соотношения и понятия непосредственно наблюдаемого мира являются необходимыми и достаточными для описания непосредственно не наблюдаемых микроскопических объектов и процессов.

Казалось бы, такой постулат классической физики несовместим с идеей дополнительности, как она только что сформулирована в общем виде, т. е. с необходимостью для каждого аспекта физического анализа, другого аспекта, который его отрицает. В классической физике как будто нет такой исключаяющей противоположности между макроскопическим и микроскопическим аспектами. Макроскопические законы, не модифицируясь, действуют в микромире, макроскопические понятия и соотношения сохраняют свою роль при переходе в микромир.

Однако такое представление о классической физике само оказывается некоторой аппроксимацией, которая оказывается недостаточной, когда мы ищем в классической науке противоречия, апории, поиски, адресованные будущему, вопросы — то, что вело классическую физику вперед, к революционному преобразованию в начале XX в. Неклассическая физика обладает не только тем, что Эйнштейн назвал «внешним оправданием», т. е. соответствием эмпирическому опыту, экспериментальным данным. Она обладает и «внутренним совершенством» — так Эйнштейн назвал выведение научной теории из максимально общих допущений, а не из частных допущений, выдвинутых *ad hoc* для объяснения данного эксперимента. Квантовая механика обладает очень большим «внешним оправданием», беспрецедентным в истории физики. Начиная с наблюдения фотоэлектрического эффекта, с экспериментального исследования спектров атомов и об-

наружения дифракции электронов, экспериментальные подтверждения дискретности излучения и волновых свойств частицы становились все более многочисленными и разнообразными. Но вырастало и «внутреннее совершенство» квантовой механики. Она получила весьма общий исходный пункт логической дедукции в принципе неопределенности. Потом еще более общий — в принципе дополнителности. Но на этом прогресс «внутреннего совершенства» не заканчивается. Рассматривая логическую структуру принципа дополнителности, как он сформулирован в нерелятивистской квантовой механике, и, с другой стороны, прослеживая «вопрошающую» компоненту классической физики, мы обнаруживаем возможность обобщения понятия дополнителности.

Обобщение понятия включает отказ от некоторых ограничивающих его определений. Дополнителность, как она фигурирует в нерелятивистской квантовой механике, определяется неустраимостью противоречащих одно другому волнового и корпускулярного представлений. Если выйти за пределы области, где существует корпускулярно-волновой дуализм, то сохранится ли понятие неотделимости исключających друг друга макроскопического и микроскопического представлений, как *физическое* понятие, т. е. как понятие, связанное с экспериментальным характером физического познания? Является ли корпускулярно-волновой дуализм единственной формой неотделимости макроскопического и противоречащего ему микроскопического аспекта?

Попробуем ответить на этот вопрос, рассматривая «вопрошающую» компоненту классической физики. Это — одна из сторон, с которых можно подойти к проблеме возможного обобщения принципа дополнителности.

2. Классическая предыстория понятия дополнителности

Нильс Бор считал возможным распространить понятие дополнителности на другие области помимо атомной и ядерной физики. Наиболее естественным представляется такое обобщение этого понятия, которое позволило бы ему проникнуть в более дробную сферу — в субъядерный мир (т. е. быть примененным при описании внутренних про-

цессов в пространственно-временных областях порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек) и, с другой стороны, в макроскопическую и, далее, в космическую физику. Мы последовательно коснемся гниотетических возможностей такого обобщения и модификации принципа дополнительности. Позже, в конце книжки, будут рассмотрены некоторые вопросы применения и модификации понятия дополнительности вне физики.

Речь не идет об изложении каких-то позитивных теорий; речь идет об анализе тенденций, о весьма спорных прогнозах и гипотезах, о гипотезах не физических, а историко-физических: они рисуют не предполагаемую структуру мира, а предполагаемое развитие, иллюстрирующее наметившиеся тенденции самой физики.

Наряду с гипотезами, относящимися к будущему, обобщение принципа дополнительности опирается на исторические реминисценции, на переоценку прошлого, на новую трактовку понятий классической физики. Чем радикальней неклассический поворот, позволяющий по-иному трактовать классические понятия, тем дальше идет ретроспективная переоценка и переосмысление ценностей прошлого.

Право на такую переоценку уже стало в физике обычным правом. Сошлемся на пример теории относительности. Эйнштейн в 1905 г. показал, что не только механические процессы, но и все физические процессы протекают единообразно в системах, движущихся без ускорения одна относительно другой, и поэтому нельзя зарегистрировать движение без ускорения абсолютным образом, по ходу внутренних процессов без регистрации изменений расстояний между данным телом и телами отсчета. До появления теории относительности Эйнштейна никто не называл *классическим принципом относительности*, или *принципом относительности Галилея — Ньютона*, утверждение о неизменности внутренних механических движений в движущейся системе, об их независимости от движения, если последнее происходит без ускорения. В течение двух с лишним столетий повторяли содержание строк галилеева «Диалога», описывающих каюту движущегося корабля, где все капли, попадающие в узкое отверстие сосуда, полет бабочек, траектории брошенных в различные стороны предметов остается таким же, как и при неподвижности корабля. Еще чаще повторяли теорему ньютоновых «На-

чал» о невозможности обнаружить движение без ускорения по поведению входящих в движущуюся систему тел. Но никто из вспоминавших или повторявших эти идеи Галилея и Ньютона не знал, что речь идет о классическом принципе относительности, подобно Журдену, не знавшему, что он говорит прозой. Но если бы мольеровский герой жил до возникновения поэзии, кто бы мог упрекнуть его за отсутствие специального термина для обычной, непоэтической речи? Разумеется, в случае классического принципа относительности дело не сводилось к новому названию, налицо было существенное переосмысление классической концепции.

Классический принцип относительности приобрел свое название в условиях исторической ретроспекции. Современная не только релятивистская, но и комплементарная, исходящая из боровской дополненности, историческая ретроспекция позволяет увидеть в классической физике некий принцип, отношение которого к принципу Бора аналогично отношению классического принципа относительности к теории Эйнштейна. В обоих случаях обнаруженное при ретроспекции классическое понятие беднее содержанием, чем современное. В наше время приходится разграничивать подобную классическую редукцию современных физических понятий и их дальнейшее неклассическое обобщение. В первом случае редуцированное понятие применяется к более узкой области и сопровождается переходом к менее точному представлению, к более либеральной аппроксимации, допустимой для этой узкой области. Во втором случае обобщение расширяет область применения, демонстрирует приблизительность старого понятия и в принципе предполагает больший ригоризм, большую точность анализа.

Когда установленную Галилеем и Ньютоном независимость *механических* взаимодействий в системе от ее движения называли принципом относительности, такая модификация эйнштейновского принципа (независимость *всех* физических взаимодействий) означала переход от более широкого круга явлений, подчиненных принципу, к более узкому — от всех физических процессов к механическим. Это был логический процесс, в известном смысле противоположный обобщению специального принципа на ускорение, переходу к общему принципу. Аналогичным образом принцип дополненности Бора может быть обобщен на

релятивистскую квантовую физику (эвристическая ценность такого обобщения для теории элементарных частиц чрезвычайно велика) и может быть сужен до степени классического аналога квантового принципа.

Мы рассматривали в качестве наиболее общего определения дополнителности неотделимость противоречащих одно другому макроскопического и микроскопического представлений о веществе. В столь общей форме идея дополнителности характерна уже для античной физики. Остановимся на некоторых формах этой идеи в античной науке и в науке нового времени.

В античной науке мы возьмем в качестве иллюстрации мысль Эпикура о спонтанных отклонениях атомов.

У Эпикура и излагающего его идеи Лукреция говорится об атомах, движущихся вертикально по прямолинейным траекториям. Такое движение определено макроскопической закономерностью — существованием абсолютного «низа», т. е. анизотропностью пространства. Но атомы, движущиеся по параллельным путям, не могут привести к той многокрасочной и сложной картине природы, которая разворачивается перед глазами человека. Поэтому Эпикур вводит представление о микроскопических спонтанных отклонениях (*clinamen*). Они заставляют атомы встречаться и благодаря вызванному таким образом взаимодействию атомов возникают макроскопические тела.

Но *clinamen* не только вводят в картину мира взаимодействие. Само существование этих спонтанных отклонений является историческим прообразом очень далеких идей, появившихся в более отчетливой и позитивной форме через много столетий и отчасти не реализовавшихся поныне. *Clinamen* придают атомам физическое бытие. В юношеской диссертации «Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура», в противовес традиционным оценкам, Маркс рассматривает *clinamen* как нечто, реализующее индивидуальное бытие атома¹.

Разумеется, концепция *clinamen* — это не предвосхищение современных физических концепций, которые стремятся придать частицам физическое бытие, наделяя их особыми, неопределенными с точки зрения макроскопических закономерностей и понятий специфическими дви-

¹ См.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. I. М., 1928, стр. 41—48.

жениями. Вообще античная наука не предвосхищала следующие открытия. Она включала их зародыши в ином смысле. Соотношение между античными и поздними идеями — это соотношение между вопросом, затруднением, апорией, поиском и прозвучавшим через века ответом, по большей части не исчерпывающим.

Но этого мало. В концепции Эпикура мы обращаем внимание на *спонтанный* характер *clipei*. Физическое бытие частицы гарантируется не только тем, что она воздействует на другие частицы и претерпевает воздействие со стороны других частиц. Помимо движений, вызванных толчками, помимо общего падения в пустоте по параллельным путям, частицы, по словам Лукреция, «в месте, неведомом нам, начинают слегка отклоняться...» без какой-либо внешней причины. Это в сущности не количественный процесс, не изменение координат, не движение в смысле «местного» движения, перемещения, приращения пройденного пути. «В месте неведомом нам» это принципиальная особенность *clipei*, мы не только не знаем их пространственных количественных определений, но и объективно *clipei* не имеют количественной определенности — об этом через несколько строк будет сказано конкретней и ясней. Сейчас только отметим, что *clipei* — это прообраз поисков спонтанного движения, поисков того, что Ленин называл ключом к «самодвижению» всего сущего¹.

Разумеется, и здесь концепция Эпикура — это только вопрос, адресованный будущему. Спонтанное движение не зависит от столкновения с другими частицами, но от чего же оно зависит? Спонтанное движение — это не количественная категория, по какой же качественный или субстанциальный смысл можно ему приписать?

Некоторые попытки ответа на этот вопрос имели место, быть может, уже у самого Эпикура или у его учеников. По свидетельству Александра Афродисийского — одного из комментаторов Аристотеля, писавшего во II в. н. э., — эпикурейцы утверждали, что пространство, время и движение состоят из далее неделимых элементов и на каждом из дискретных отрезков «движения нет, а есть только результат движения». По-видимому, это значит, что атом не передвигается в соседнюю пространственную клетку, а

¹ См.: В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 29 («Философские тетради»). М., 1963, стр. 352.

исчезает в первой и возникает во второй, что и представляет собой «результат движения» при отсутствии такового, так как результат подобной регенерации совпадает с результатом движения со скоростью, равной частному от деления элементарной длины на элементарную длительность.

Конечно, по этому отрывку трудно составить определенное представление о взглядах учеников Эпикура, да и сами эти взгляды могли быть достаточно неопределенными. Еще труднее судить о логической связи между идеей дискретности движения, пространства и времени и другими идеями эпикурейцев. Не исключено тем не менее, что концепция дискретности связана с идеей *исотаксии* — постоянной скорости движения атомов, высказанной Эпикуром в письме к Геродоту. Эта скорость (Эпикур называет ее «скоростью мысли») сохраняется и при столкновениях атомов, меняется только ее направление. В ультрамикроскопических ячейках скорость равна «скорости мысли» и постоянна. Конечно, велико искушение отождествить «скорость мысли» Эпикура с постоянной скоростью «результатов движения», о которых писал Александр Афродисийский. Но для констатации «вопрошающей» стороны античной мысли так далеко и не надо идти: наличие сравнительно конкретной формы вопроса о спонтанных движениях бесспорно.

Представляет ли он интерес для характеристики ранних antecedентов дополнительности макроскопического и микроскопического аспектов в физике?

Какими бы ни были подробности картины *исотаксии* в утраченных трудах Эпикура, по письму к Геродоту и по строкам поэмы Лукреция можно утверждать следующее. Физика Эпикура содержала в зародыше противопоставление макроскопического и микроскопического аспектов, причем не только классическое противопоставление непосредственно постижимых движений макроскопических тел и не регистрируемых непосредственно микроскопических движений, но и другое, более сложное и глубокое противопоставление. Картина хаотического движения атомов, которое Лукреций сравнивает с движением пылинок в солнечном луче, — прообраз игнорируемых движений. Механизм перехода к макроскопическим движениям напоминает броуновское движение: пылинки движутся под влиянием ударов невидимых частиц.

Классическая идея игнорирования индивидуальных движений, тесно связанная со специфическим для XIX в. представлением о сущности одних движений и несущественности других, высказана в зачаточной форме в другой в целом неклассической, чуждой классической физике XVII—XIX вв. концепции. Речь идет об уже упоминавшейся исотаксии. Как из *постоянной* скорости микроскопических движений атомов получаются *различные* скорости (в том числе нулевая скорость — покой) макроскопических тел? Лукреций рисует картину стада, в котором животные движутся с одной и той же скоростью в различных направлениях, часто меняя их. На расстоянии, когда стадо кажется одним большим пятном на фоне пастбища, оно представляется неподвижным или медленно движущимся. Аналогичная картина — поле битвы, когда нельзя уловить «микросмещения» сражающихся воинов.

Логический переход к представлению о равной вероятности исотактических смещений в различные стороны, когда макроскопическое тело остается неподвижным, и о диссимметрии вероятностей, вызывающей то или иное по скорости и направлению движение макроскопического тела, кажется очень простым переходом. Но он мог быть реализован только через две с лишним тысячи лет. Реализован за пределами классической физики. Само понятие исотаксии было тенденцией, выходящей за рамки чисто механической концепции движения, так же, как и понятие спонтанных движений. Если оно связывалось с дискретностью движения, как ее сформулировал от лица эпикурейцев Александр Афродисийский, то такая тенденция направлена к аристотелевской концепции субстанциального движения — возникновения ($\gamma\epsilon\nu\eta\sigma\iota\varsigma$) и аннигиляции ($\phi\upsilon\omicron\rho\acute{\alpha}$) тел.

Концепции исотаксии и *clinamen* являются зародышевой формой мысли о немеханической природе некоторого *ультрамикроскопического* мира, который служит подосновой микроскопического мира невидимых (но не отличающихся по своей природе от видимых) непрерывных движений тождественных себе атомов, не подвергающихся аннигиляции, порождениям и регенерациям. Зародышевой формой в уже указанном смысле, в смысле адресованного будущему вопросу.

Когда в XIX в. была открыта несводимость статистиче-

ских процессов к обратимым механическим моделям, вспомнили об аристотелевском понятии качественного движения (*ἄλλοιωσις*). Еще через сто лет создавалась обстановка, позволившая вспомнить о *γένεσις* и *φθορά* и сблизить их с представлением о трансмутациях частиц как о фундаментальных процессах.

Физика Эпикура была этапом на одной из важнейших дорог греческой мысли. Речь идет о поисках того сохраняющегося, пребывающего, тождественного себе субъекта изменений, без которого теряет смысл само понятие изменения. Дополнительность этих исключающих одно другое и в то же время теряющих смысл один без другого аспектов была первой и наиболее глубокой апорией, с которой столкнулась физическая мысль уже при своем первом взлете в ионийских колониях Греции. Изучая в тот период по преимуществу качественные превращения, она стремилась увидеть неизменный субстрат качественной эволюции в одном из качественно различных элементов природы — в воде, в огне, затем в более общем элементе — *апейроне*; подчас она отступала и в лице элеатов отрицала движение и изменения и, таким образом, пыталась уйти от неизбывной апории; далее, она рассматривала как тождественный себе субстрат изменений качественно различные элементы Эмпедокла и, наконец, стихии Аристотеля.

Когда античная атомистика отказалась от субстанциальных качественных различий и свела их к числу, форме, величине и расположению атомов, кардинальная апория себестождественности и изменения приняла особенно отчетливую форму. Изменение свелось к перемещению. Но что движется, что перемещается, что является неисчезающим субъектом движения, что отличает действительное движение — физическое понятие — от движения геометрического объекта — точки, линии, объема?

Именно сейчас, в свете современной физики, в свете принципа дополнительности, в поисках его antecedентов, мы можем оценить глубину этой «субъект-предикат-проблемы» и увидеть ее ускоряющее воздействие на прогресс физической и философской мысли.

Когда Левкипп и Демокрит изгнали из природы качественные различия, они должны были сохранить одно из них — различие между заполненным объемом — атомом и незаполненным пространством — пустотой. Но какие же предикаты имеют субстанциальный характер и отличают

демокритово «бытие» от демокритова «небытия»? Прежде всего к ним относится непроницаемость. Непроницаемый атом сталкивается с другими, он взаимодействует с ними. Но это нарушает сведение бытия к пространственным и количественным предикатам. И вот Эпикур спасает вещь — существование атома, его отличие от пустоты, наделяя атом спонтанными отклонениями. Движение, определенное макроскопическими условиями, не может выполнять такой функции. Атомы движутся вниз по параллельным направлениям. Но такие направления могут характеризовать и направленные вниз линии — геометрические объекты. Даже движение, вызванное толчком, может характеризоваться геометрическими предикатами. Именно спонтанный характер *clinamen* делает их гарантией индивидуальности атома, его существования как *субъекта* движения.

В сущности моральная концепция Эпикура — *clinamen* спасают человека от естественно-научного фатализма — это эквивалент онтологической концепции. В случае полного подчинения физической необходимости человек становится точкой нарисованного природой чертежа, его существование растворяется в его поведении, так же, как существование атома без *clinamen* сводится к его поведению, предписанному анизотропностью пространства и импульсами при соударениях.

Быть может, Эпикур пошел и еще дальше, быть может он приписывал атому смену уничтожения и возникновения в дискретном пространстве и времени. Но это не выходит за пределы демокритовского «бытия» и «небытия», только их различие здесь дано не как пространственная граница между атомом и пустотой, а как спонтанное разграничение во времени.

Наконец, Эпикур приписывает атому некоторую постоянную скорость (*isotakhia*) — ее постоянство также имеет спонтанный характер и должно гарантировать существование атома, не сводящегося к его зависящему от внешних импульсов поведению.

В целом физика Эпикура — это попытка утвердить несводимое к поведению существование атома (предложение, приписывающее атому движение, должно иметь не только сказуемое, но и подлежащее) в рамках пространственного и количественного воззрения. Существование атома, несводимое к его поведению, гарантируется особым, спонтанным, но все же *движением*. Если движение немыс-

лимо без существования его субъекта, то в свою очередь существование атома немислимо без его движения.

Греческая мысль билась в рамках противопоставления *поведения* физических объектов, которые она расшифровывала как движение и изменение, и *существования* их, которое представлялось псевдонимом неизменности. У Эпикура эти определения стали дополнительными — существование выражается в спонтанных нарушениях макроскопически определенного движения, движение приобретает физический смысл будучи движением спонтанно нарушающего его субъекта.

Эта дополнительность приобретает характер дополнителности макроскопически определенного движения (анизотропность пространства) и его ультрамикроскопических нарушений.

Через две тысячи лет после Эпикура была сделана чрезвычайна смелая попытка устранить проблему разграничения вещества и пространства. Декарт отождествил пространство с веществом. Но не с гетерогенным веществом, состоящим из качественно различных элементов, как это было сделано в физике Аристотеля. Декарт отождествил пространство с веществом, которое не имело других предикатов, кроме пространственных. Таким образом, не только пространство было отождествлено с веществом, но и вещество — с пространством. Все же это была скорее «физикализация» пространства, чем геометризация вещества: части пространства были наделены непроницаемостью и лишены конгруэнтности, тем самым они получили возможность взаимодействовать и в, казалось бы, чисто кинематическую физику Декарта вошла динамическая тенденция.

Но отождествление пространства с веществом сделало невозможным индивидуализацию тела, выделение тела из окружающей его среды. Декарт хотел спасти индивидуальность тела, приписав ему движение относительно среды. Но индивидуализация тела должна быть не результатом движения, а его предпосылкой; если тело качественно не отличается от среды, его движение может быть только воображаемым, оно не может быть зарегистрировано, оно превращается в геометрический образ, теряет физическую содержательность. Это коренное затруднение картезианской физики заставило науку XVII в. вернуться к атомистическим представлениям в духе античного противопоставления частиц и пустоты. При этом Лейбниц не только

приписал атомам динамические свойства, но и объявил последние нематериальной субстанцией.

Еще раньше наука XVII в. в философии Спинозы дала удивительно стройную концепцию существования и поведения тел.

В 1663 г. Спиноза выпустил изложение философии Декарта с предисловием издателя, которое было согласовано с автором. Здесь указаны отличия философии Спинозы от картезианства. Наиболее радикальное отличие — отрицание границ физического познания мира. Физика Декарта с ее соударениями тел, вихрями, движением и дроблением различных по величине и форме элементов вещества объясняла *поведение* тел и *действие* фундаментальных законов. *Существование* тел и *существование* фундаментальных законов были у Декарта границей физики, проблема существования мира относилась к метафизике Декарта, и оно объяснялось божественной волей. У Спинозы не только поведение тел, но и само существование природы объясняется физическими причинами.

В классической физике, начиная с ее истоков, т. е. с идей Галилея, Декарта и Ньютона, поведение тела — изменение состояния его движения — обязано импульсам, взаимодействию с другими телами. *Существование* системы взаимодействующих материальных тел находилось вне пределов физического объяснения. Спиноза перешагнул через этот барьер, отделявший физику Декарта от его метафизики и классическую науку в целом от проблем, которые либо вовсе не ставились, либо ставились и решались в метафизическом плане.

Но как физически объяснить само существование природы? Ведь вне ее нет ничего, что могло бы служить физической причиной такого существования.

Спиноза выводит существование природы из ее действия на самое себя, из самодействия природы. Субстанция воздействует на себя, она является причиной своего существования, *causa sui*. Субстанция как *causa sui* означает, что природа не только произведена (*natura naturata*), но и является производящей природой (*natura naturans*). Таким образом, существование в отличие от поведения связано не с внешними воздействиями, а с самодействием.

Эта концепция почти не имеет antecedентов. Спонтанные *clipses* выходят за рамки концепции внешних воздействий, как конечного пункта физического анализа, и

могут стать antecedentом теории, сближающей существование частиц (в частности, существование массы) с самодействием частицы, например излучением и поглощением виртуальных частиц. Но у Спинозы проблема состоит в существовании всей Вселенной, он рассматривает всю Вселенную как *causa sui*, как систему, взаимодействующую с собой.

Классическая физика и с некоторыми ограничениями нерелятивистская квантовая физика сосредоточили свое внимание на расстояниях между телами, изменениях этих расстояний со временем, ускорениях, причинах ускорений — полях, массах и зарядах, пространственной метрике, мировых линиях, вообще на проблемах *поведения* тел. Проблема *существования* субстанции и ее самодействия отличает только начинающуюся сейчас полосу эволюции физической мысли.

Но классическая наука подготовила, а релятивистская и квантовая физика первой четверти XX в. начали переход от *natura naturata* к *natura naturans*, от физических аналогов картезианства к физическим аналогам понятий Спинозы. С этой точки зрения мы и взглянем сейчас на классическую науку.

Великим открытием классической науки XIX в. была несводимость сложных форм движения к более простым, иерархия форм движения, соответствующая иерархии дискретных частей вещества. Этот круг идей — он получил рациональное и обобщенное выражение в «Диалектике природы» — охватывает и термодинамику, и новую атомистику (иерархия частиц — молекул, атомов, электронов, с несводимыми, специфическими закономерностями в каждом звене), и новую теорию эволюции (качественные переходы, несводимость закономерностей биологической эволюции к более общим закономерностям). Но исходным пунктом была несводимость макроскопической термодинамики с необратимыми переходами и возрастанием энтропии — к механике молекул.

Обобщение этого соотношения между макроскопическим (необратимые закономерности термодинамики) и микроскопическим (механика молекул) аспектами было важным этапом предистории принципа дополнительности. Античная наука знала, вернее догадывалась, о специфических движениях в микромире (*исотакhia*, *clinamen*). Наука нового времени пыталась идентифицировать их, присваи-

вая макроскопические закономерности микромиру Наука XIX в. показала своеобразное, ранее лишь интуитивно предполагавшееся соотношение между микромиром и макромиром: макроскопические направления тепловых потоков отличаются от микроскопических закономерностей, но неотделимы от них. Попытки оторвать макроскопическую картину переходов энергии от микроскопической картины молекулярных сдвигов были преодолены развитием физики, и на рубеже XIX и XX вв. такое преодоление стало важной предпосылкой выхода за пределы классической науки — теории излучения черного тела.

Концепция несводимости не только модифицировала представление о различии и взаимной неотделимости микроскопического и макроскопического аспектов. Она по-новому поставила проблему движения и субъекта движения. Когда в теле выравнивается температура или происходит какое-либо другое *движение* тепла, речь идет о движении как распространении некоторой средней (меняющейся при этом) температуры, т. е. каких-то движений молекул. Движение в одной форме (молекулярная механика) служит субъектом движения в другой форме (макроскопические перемещения тепла).

Начиная с Максвелла дополнительность движения и субъекта движения приобретает новую форму. Субъектом движения становится колебание интенсивности взаимодействия — электромагнитного поля, которое отделяется от взаимодействующих тел и приобретает субстанциальный характер. Попытки свести эти колебания к перемещению частей некоторой среды — механические модели эфира — не имеют успеха, и в конце концов колеблющаяся среда теряет основной предикат механического объекта: эфир не может служить телом отсчета, и его устраняют из картины мира. Дополнительность микроскопического аспекта в теории поля (волны) и макроскопического аспекта (геометрическая оптика) приобретает новый вид, когда волны демонстрируют свойства частиц (теория световых квант Эйнштейна), а частицы — волновые свойства (де Бройль, Шредингер).

Нетрудно видеть, что волновое представление о движении частицы и корпускулярное представление о распространении волны представляют собой модификацию фундаментальной, характерной для всякого *физического* анализа дополнительности движения и субъекта движения. Возь-

мом корпускулярное представление. Перед нами частица в качестве субъекта движения. Де Бройль обнаружил тот факт, что поведение частицы, ее движение подчиняются волновым закономерностям. Шредингер нашел уравнение, выражающее эту закономерность, а Борн интерпретирует ее как закономерное изменение вероятности пребывания электрона в каждой точке, в каждый момент. Субъект движения становится физическим объектом при том или ином поведении, движении, взаимодействии. Это и выражается в необходимости присоединения к корпускулярному представлению о субъекте движения дополнительного волнового представления.

Теперь возьмем волновое представление. Перед нами распространение волны, например электромагнитной волны. Субъектом поведения, субъектом движения является волна: в пространстве распространяются колебания с той или иной характеризующей их частотой и амплитудой. Эйнштейн обнаруживает, что поведение волны в явлениях фотоэффекта подчинено корпускулярным закономерностям. Поскольку физическое бытие требует, чтобы характеристика субъекта дополнялась характеристикой поведения, волновое представление о субъекте — электромагнитной волне — дополняется корпускулярным представлением о фотоне.

Когда не были известны волновые свойства электрона и корпускулярные свойства электромагнитного излучения, не было почвы для идеи дополнительности волнового и корпускулярного аспектов. Но этих открытий недостаточно для «внутреннего совершенства» этой идеи. При всей своей широте (это самая широкая и общая идея атомной физики) она является модификацией (необходимость модификации вытекает из открытий и обобщений, создавших неклассическую теорию микромира) еще более общей идеи, стержневой идеи физического мышления.

Чтобы очертить эволюцию этой общей идеи, мы и коснулись некоторых исторически возникавших ее модификаций. Нетрудно видеть, что ее эволюция — одно из направлений диалектического понимания физических категорий. Но диалектическое осмысление физических понятий не может состоять в их сведении к общим принципам диалектики, потому что эти общие принципы как раз и требуют конкретизации и развития исходных категорий. Для определения роли понятия дополнительности в релятивистской

квантовой физике особенно важно представление о диалектике как учении не только о логических путях познания и не только о познании в целом, но и *бытии*.

Анализ тенденций, ведущих к обобщению принципа Бора, начинается с объективного определения новой области, в которой этот принцип может применяться при своей модификации. Познание природы включает переход ко все более дробным ступеням иерархии дискретных частей вещества. Сейчас мы можем охарактеризовать этот процесс несколько точнее. Из соотношения неопределенности между энергией и временем следует, что переход во все меньшие пространственно-временные области связан с изучением все более высоких, сконцентрированных в этих областях энергий.

Развитие физики (и не только физики, но и цивилизации, в той мере, в какой она связана с физикой, т. е. во все растущей мере) — это последовательное изучение и применение все больших концентраций энергии. Сначала изучали и применяли макроскопические энергетические перепады, потом энергии, связанные с перегруппировкой атомов в молекулах, со сгоранием топлива, потом процессы в атоме и, наконец, ядерные процессы и, соответственно, энергии порядка миллионов и даже миллиардов электронвольт. В настоящее время физика находится на пороге нового периода, связанного с использованием в эксперименте энергий порядка десятков и сотен миллиардов электронвольт. Речь идет об ускорителях, сообщаящих частицам такие энергии, а также об изучении космических лучей, состоящих из частиц, обладающих и более высокими энергиями. Такие энергии позволяют исследователю изучать пространственно-временные области порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек.

Есть все основания думать, что здесь — более радикальный переход к новым закономерностям, чем переход в молекулярные и атомные области, если только эта большая радикальность — не иллюзия, рожденная тем, что уже найденное вскоре уже не кажется парадоксальным. Во всяком случае, субъядерные линейные размеры — порядка радиуса ядра и интервалы времени, необходимые свету, чтобы пройти такие расстояния, могут и не быть ареной непрерывных движений тождественных себе частиц. Пока еще нет оснований, чтобы судить об этом с уверенностью. Развитие физики высоких энергий как раз и позволит не только судить о том, что может иметь место и что не может

иметь места в субъядерном мире, но и однозначно выяснить, что же там действительно происходит. Можно предположить, что мир непрерывных движений тождественных себе тел ограничен снизу масштабами порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек или же еще меньшими.

Можно пойти дальше, предваряя эксперименты, которые будут сделаны с помощью ускорителей порядка тысячи миллиардов электронвольт. Не исключено, что в субъядерных областях исследователь найдет ответ на вопрос о причинах, обуславливающих спектр масс элементарных частиц и вообще различия между типами элементарных частиц. Этот вопрос уже сам неясен, даже помимо неизвестности ответа. Понятие *элементарности* частиц пока не имеет бесспорной расшифровки. Допустим, что элементарные частицы — это частицы, сложность которых не сводится к существованию сгруппированных тем или иным образом субчастиц. Не исключено, что их существование является результатом взаимодействия с другими частицами, иначе говоря, Вселенная существует как самосогласованная система частиц, из которых существование каждой является результатом существования всех частиц. Тогда Вселенная существует благодаря взаимодействию с собой как спинозская *causa sui*.

Подобные совершенно неопределенные догадки могут быть лишь туманными иллюстрациями реальной возможности встретить в областях порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек процессы, коренным образом отличающиеся от процессов в атомных областях.

Если в ультрамикроскопических областях уже не движутся (хотя бы и с неопределенными динамическими переменными) тождественные себе частицы и здесь теряет смысл дополнительность корпускулярных и волновых определений, то сохранится ли здесь, и если сохранится, то в какой форме, более общий принцип дополнительности.

Дополнительность в нерелятивистской квантовой механике — это дополнительность волнового и корпускулярного аспектов при описании *поведения* тождественных себе частиц. Но области порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек, быть может, окажутся областями *бытия*, областями, где вопрос «как движется» окажется неотделимым от вопроса «как возникает» частица. Этот последний вопрос уже не может быть решен с помощью классических понятий положения и импульса и даже с помощью неклассических

понятий вероятности положения и импульса тождественной себе частицы. Сохраняется ли при этом дополнительность — уже не дополнительность волнового и корпускулярного аспектов при описании движения тождественной себе частицы, а более общая дополнительность движения и субъекта движения, которая последовательно модифицировалась и принимала различные формы на протяжении всего развития физики? Дополнительность, которая вытекает из самой сущности физического познания мира, из сочетания логического вывода конкретных понятий и их эмпирического обоснования в эксперименте? Дополнительность, отделяющая физику в самом широком смысле (соответствующем смыслу аристотелевой «Физики»), как наиболее общее учение о *бытии*?

К ответу на эти вопросы мы подойдем в следующей главе.

3. Относительность, дополнительность, бытие

Античная физика включала в форме апорий и догадок зародыши всех последующих модификаций исходной противоположности изменений и их тождественного себе субъекта. Классическая физика XVII—XVIII вв. раскрыла неразрывность и в то же время противоположность кинетического и динамического представлений. Физика XIX в. оперировала, с одной стороны, механическими моделями микромира и, с другой стороны, макроскопическими представлениями о необратимых процессах. Существует ли аналогичная коллизия двух противоположных, но теряющих один без другого смысл полюсах в релятивистской физике, т. е. в физике, согласующей свои утверждения с теорией относительности Эйнштейна?

В этой главе мы ограничимся специальной теорией относительности. Она была создана в 1905 г., когда Эйнштейн положил в основание физики представление о неизменной скорости распространения света в движущихся без укоренения одна относительно другой системах отсчета. Эйнштейн связал тот парадоксальный факт, противоречащий классическому правилу сложения скоростей, с идеей физической неразделимости пространства и времени. В классической механике Ньютона допускалось мгновенное распространение сил. Такой процесс означает, что в одно и то же мгновение одно тело действует на другое и

одновременно второе тело воспринимает этот импульс. В этом случае можно говорить о физическом эквиваленте чисто пространственного представления: в нулевое время, в один и тот же момент, происходит нечто реальное — передача импульса. Чисто пространственная, трехмерная геометрия представляется точным описанием физической реальности.

Релятивистская физика отрицает бесконечную скорость распространения импульсов и передачу энергии из одной точки пространства в другую, в какой бы форме они ни происходили. Тело, летящее с бесконечной скоростью, абсолютно твердый стержень, мгновенно передающий импульс, твердый вал, передающий вращение, жесткая система, соединяющая мгновенной передачей импульса и энергии отдаленные тела, — все это становится неточным описанием природы, непригодным для описания процессов, в которых участвуют движения со скоростью, сопоставимой со скоростью света. Скорость света — граница скоростей тождественных себе тел, граница скоростей всех процессов передачи энергии и импульса, всех процессов, соединяющих события, из которых одно служит причиной другого. Последняя фраза дает представление о *релятивистской причинности*.

Из подобных утверждений следует, что физически содержательной будет геометрия, описывающая процессы, происходящие с конечной скоростью, т. е. процессы, при которых растет не только пройденное физическим объектом пространство, но и время.

Такой геометрией является четырехмерная геометрия, определяющая каждую точку четырьмя координатами, из которых три — пространственные координаты, а четвертая — время. Об этом уже говорилось в начале книги, но теперь уже высказанные замечания о четырехмерном мире и четырехмерных мировых точках и мировых линиях следует повторить в несколько более систематичной форме.

Эйнштейн и Минковский показали, что, построив четырехмерную геометрию, аналогичную всем известной евклидовой геометрии (так называемую *псевдоевклидову* геометрию) мы получим геометрическую схему, описывающую движения материальных точек. Забегая вперед, заметим, что в общей теории относительности Эйнштейн пользуется неевклидовой геометрией. Переход от евклидовой геометрии к неевклидовой соответствует искривлению

пространства-времени. Такое искривление Эйнштейн отождествил с тяготением.

Специальная теория относительности переходит от геометрической схемы к физическому представлению, рассматривая элементарные *события*, пребывания в четырехмерных точках псевдоевклидова пространства, т. е. в определенных пространственных точках и в определенные моменты некоторых материальных частиц, размерами которых можно пренебречь. Такая частица обладает тремя пространственными и четвертой временной координатами, т. е. занимает определенную четырехмерную мировую точку, а ее поведение сводится к изменению пространственно-временной локализации и описывается четырехмерной мировой линией. Четырехмерная мировая линия, описывающая движение тождественного себе физического объекта, не может проходить под углом, превышающим угол мировой линии света, по отношению к координатной оси времени; иначе говоря, скорость движущейся частицы (это и есть угол между мировой линией и осью времени) и вообще всех тождественных себе физических объектов не может быть большей, чем скорость света. Эти мировые линии ограничены мировыми линиями света, поверхностью так называемого *светового конуса*. Указанные мировые линии, и только они, описывают причинные связи в релятивистской физике. Ими ограничена релятивистская причинность. Если частица получает все новые и новые импульсы, она не будет неограниченно увеличивать свою скорость, по мере приближения к скорости света, дальнейшие импульсы будут вызывать все меньшее ускорение, а когда скорость частицы достигает значения, равного скорости света, дальнейшего ускорения уже не будет. Это можно выразить и в такой форме: по мере возрастания скорости растет и масса частицы, а когда скорость частицы приближается к скорости света, масса приближается к бесконечности; масса движущейся частицы пропорциональна ее энергии. Эйнштейн предположил, что масса *покоящейся* частицы пропорциональна ее *внутренней* энергии.

Движущиеся тождественные себе частицы (в их число входят и *поля*, в 1905 г. Эйнштейн пришел к мысли, что свет состоит из фотонов, а в дальнейшем и другие поля были представлены как совокупности частиц) передают друг другу импульсы и энергии и через них устанавливается причинная связь, превращающая Вселенную в упоря-

доченное целое. Эйнштейн назвал движения тождественных себе тел и световые лучи, переносящие энергию и импульс, *сигналами*. Схема вселенской каузальной гармонии — это каркас мировых линий сигналов, движений тождественных себе частиц. Разумеется, две различные частицы могут быть соединены любой мировой линией, в том числе параллельной пространственной оси, т. е. соединяющей одновременные события. Но такие мировые линии, проходящие вне светового конуса, не являются мировыми линиями тождественных себе частиц, не описывают пространство сигналов, не образуют каркаса объединяющей Вселенную релятивистской причинности.

Однако в мире Эйнштейна фигурируют и другие объекты, помимо движущихся частиц. Из нарисованной только что четырехмерной схемы образующих каркас Вселенной мировых линий тождественных себе, смещающихся одна относительно другой частиц выпадают *системы отсчета*. Они представляются континуальными, мы игнорируем их дискретную структуру, мы приписываем им абсолютную твердость и позволяем составляющим их частицам не участвовать в гарантирующих каузальную гармонию мира процессах передачи импульса и энергии.

Прежде чем перейти к анализу понятия системы отсчета, заметим, что Эйнштейну не была чужда мысль о необходимости иных, противоположных данному, противоречащих ему определений, чтобы данное определение имело физический смысл. Эта мысль получила очень отчетливое выражение в квантовой механике, где мы встретили образ макроскопического объекта, который обладает гарантированными, точно определяемыми свойствами и гарантированной, точно определяемой реакцией на воздействия извне. Но, как мы сейчас увидим, не только в квантовой механике необходимо сознательное игнорирование воздействия микроструктуры тела на его метрические и динамические свойства. Не только в квантовой механике без такого игнорирования ученый уподобится тому лицензиату, о котором напоминал Л. Розенфельд, излагая идеи Бора.

История этого лицензиата, заимствованная из датской литературы, весьма поучительна: он хотел написать научный труд, детально изучал процесс затачивания перьев, в обуявшей его беспредельной добросовестности перешел к анализу минералогической структуры камней, применя-

емых для точки перьев, и... труд его так и не был написан. В сущности эта грустная история иллюстрирует фундаментальный закон, высказанный в весьма общей форме Эйнштейном. В 1953 г. Эйнштейн писал своему другу юности Морису Соловину о том, что понятие твердого тела — аппроксимация, игнорирующая атомистическую структуру тел, а также отмечал, что тела, служащие орудием измерения других тел, воздействуют на эти тела. Таким образом, независимые от измерения пространственные свойства тел, строго говоря, представляют собой абстракцию, лишенную физического смысла. Но Эйнштейн понимал, что требование: «строго говоря» не всегда уместно. Свое замечание о воздействии измеряющих тел на измеряемые Эйнштейн заканчивает фразой: «Если не грешить против разума, нельзя вообще ни к чему прийти»¹.

Эта формула естественно ассоциируется с квантовой механикой и кажется неожиданной в устах Эйнштейна. Но в действительности она не является случайной. Более того, ее одной достаточно, чтобы задуматься над традиционным противопоставлением идей Эйнштейна и идей Бора. Мысль о непрерывном ряде искажаемых измерением положений материальной точки была весьма общей предпосылкой физических построений Эйнштейна. Акт измерения координат материальной точки не изменяет этих координат, они определяются начальными условиями, приложенными силами и преобразованиями систем отсчета. Постулат независимости измеряемых величин от актов измерения связан с постулатом независимости системы отсчета от ее микроструктуры, если под системой отсчета понимать, как это делал Эйнштейн, абсолютно твердое тело, которое может быть продолжено в любую сторону, и в этом смысле представляет собой сколь угодно обширную и разветвленную систему линеек.

Эйнштейн придавал понятию положения в пространстве физический смысл при следующих условиях, вводимых в специальной теории относительности (и непригодных, как мы увидим в общей теории).

Пространственное описание места какого-либо события начинается с указания, с какой точкой твердого тела

¹ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine. Paris, 1956, p. 129.

совпадает данное событие. Чтобы это твердое тело могло рассматриваться как тело отсчета, мы должны допустить, что оно может увеличиться так, чтобы достичь предмета, положение которого нужно определить. Далее, можно заменить общее увеличение тела удлинением трех линеек, соединяющих место предмета, положение которого нужно определить, с тремя взаимно перпендикулярными, надлежащим образом продолженными плоскостями, связанными с упомянутым твердым телом. «На практике,— пишет Эйнштейн,— эти три плоскости образующие систему координат, обычно не применяются, а сами координаты определяются без построений с твердыми масштабами. Однако, во избежание неясности в результатах и выводах физики и астрономии, всегда следует искать физический смысл определения места»¹. В примечании к этой фразе Эйнштейн предупреждает, что подобное представление видоизменяется в общей теории относительности.

Нетрудно видеть, что тело отсчета, эвентуально охватывающее своими взаимно перпендикулярными гранями и линейками сколь угодно большое пространство, является по отношению к четырехмерному миру движущихся частиц государством в государстве. Здесь не проходят четырехмерные мировые линии, здесь, внутри тела отсчета, несмотря на его не только макроскопические, но и эвентуально космические размеры, нет места передачам импульса и энергии, здесь релятивистская причинность не реализуется.

Мы говорим о сигналах и о скорости их распространения, имея в виду пространственные измерения, сделанные по отношению к существенно макроскопическим и континуальным телам. Сигналы теряют кинематический смысл без постулата тел отсчета, не входящих в схему движущихся частиц. Часы, измеряющие время, тоже — существенно макроскопические тела, их дискретная структура игнорируется, и внутри движущихся и отмечающих время элементов часов движение частиц не учитывается. Во всяком случае расстояние между двумя отметками на теле отсчета не зависит от микроструктуры, так же, как время, протекшее между двумя периодически повторяющимися показаниями часов, не зависит от микроструктуры часов.

¹ См.: А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. 1. М., «Наука», 1965, стр. 534.

Эйнштейн не считал постулат независимости метрических свойств масштабов и часов от их микроструктуры достаточным обоснованием теории относительности. В автобиографическом очерке 1949 г. он писал: «Это в известном смысле нелогично; собственно говоря, теорию масштабов и часов следовало бы выводить из решений основных уравнений (учитывая, что эти предметы имеют атомистическую структуру и движутся), а не считать ее независимой от них»¹. Об этом же говорил впоследствии Гейзенберг; по его мнению, масштабы и часы «построены, вообще говоря, из многих элементарных частиц, на них сложным образом воздействуют различные силовые поля, и поэтому не понятно, почему именно их поведение должно описываться особенно простыми законами»².

Но здесь приходилось «грешить против разума».

Ценой этого греха Эйнштейн смог придать физической содержательность геометрическим соотношениям, создать иное, не существовавшее до теории относительности соотношение между геометрией и физикой и этим радикально изменить стиль и геометрического и физического мышления. Остановимся на этом подробнее.

С. Н. Бернштейн в качестве эпиграфа к «Опыту аксиоматического обоснования теории вероятностей» взял великолепную формулу Лапласа: «Человеческий разум испытывает меньше трудностей, когда он продвигается вперед, чем тогда, когда он углубляется в самого себя». Если считать конструирование многомерных пространств и аксиоматизацию математики «углублением разума в самого себя», а физику — «продвижением разума вперед», то теория относительности нарушила такое противопоставление. В специальной теории относительности размерность геометрической структуры мира приобрела физический смысл, стала проблемой, которая решается экспериментом. В общей теории относительности вопрос об евклидовой или неевклидовой метрике приобрел физический смысл и может быть решен экспериментом и наблюдением. Следует подчеркнуть роль тела отсчета, независимого от своей микроструктуры, в этой «физикализации» геомет-

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. IV, стр. 280.

² В. Гейзенберг. Замечания к эйнштейновскому наброску единой теории поля. — В сб.: Эйнштейн и развитие физико-математической мысли. М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 65.

рических коллизий, столь характерной для научного мышления в XX в. Образ такого тела с гарантированной в каждой мировой точке метрикой позволяет представить природу как каркас мировых линий с той или иной евклидовой или неевклидовой структурой.

В классической науке вопрос о физической содержательности геометрических понятий не был характерен для физического мышления. Ответы на этот вопрос были различными, но всегда тривиальными. Картезианцы отождествляли пространство и вещество; геометрические соотношения и были для них физическими, и физическая содержательность геометрических понятий вытекала тривиальным образом из такого отождествления. Для других направлений физической мысли XVII—XIX вв. геометрические понятия были результатом абстрактного игнорирования конкретных физических предикатов тел либо априорными определениями. Отсюда так же следовало тривиальное отрицательное решение вопроса о физической содержательности.

Эйнштейн увидел физическую, т. е. требующую экспериментального решения, проблему там, где до него видели нечто, либо априорно очевидное, либо эмпирически очевидное. Такой подход к вопросу о физической содержательности трехмерного пространства привел к специальной теории относительности: физической содержательностью обладает четырехмерная псевдоевклидова геометрия. Когда последняя в свою очередь подверглась проверке на физическую содержательность, этот титул перешел в неевклидовой четырехмерной геометрии — появилась общая теория относительности. Эйнштейн, далее, искал теорию, которая не только объясняет форму мировых линий, но и объясняет существование дискретных частиц на этих линиях. Однако поиски более общей геометрии, из которой можно было вывести существование других полей, помимо гравитационного, взаимодействия этих полей и существование элементарных частиц, — эти поиски остались безрезультатными.

Физическая содержательность мировых линий была еще больше обоснована в рамках теории, которая приписывает частице не только пространственно-временную локализацию, но и взаимодействие, ставящее под вопрос определенность такой локализации. В этом смысле идеи Бора придали физической содержательность еще больше-

му, по сравнению с теорией относительности, «углублению разума в самого себя».

В самом конце 20-х годов появились первые симптомы приближения науки к такой области, в которой нужны были новые понятия и соотношения, учитывающие и релятивистские, т. е. фигурирующие в теории относительности закономерности и квантовые закономерности. Выше уже говорилось, что Эйнштейн связал массу покоящейся частицы с ее внутренней энергией. Когда энергия движения частицы приближается к ее внутренней энергии, делается равной ей и даже превышает ее, становятся возможными совершенно новые процессы — превращение частицы одного типа в частицу другого типа. Такие процессы — трансмутации частиц — знаменуют собой переход из области *поведения* тождественных себе частиц в область их существования. Здесь вопрос стоит уже не о сказуемом («как движется?»), а о подлежащем («что движется?»). Понятие трансмутации частиц является современным эквивалентом уже не аристотелевой категории перемещения («местного движения», *φορά*) и даже не качественного изменения (*αλλοιοῦσις*), а «субстанциального движения» — возникновения (*γενεσις*) и уничтожения (*φθορά*).

Сейчас, когда вопросы *существования* каждого типа элементарных частиц (т. е. вопросы о *природе* предикатов, отличающих один тип частиц от другого) стоят в центре внимания теоретической физики, мы видим в появлении релятивистских квантовых концепций подготовку перехода от проблем поведения тождественных себе частиц — их взаимодействия, определяющего движение, и самого движения — к проблемам существования. Релятивистские квантовые концепции появились, как было сказано, в самом конце 20-х годов. К ним мы и перейдем.

Волновое уравнение Шредингера не учитывает соотношений теории относительности. Дирак в 1927 г. написал волновое уравнение, которое учитывало эти соотношения. Но в релятивистском уравнении фигурирует квадрат энергии, и мы, чтобы получить ее значение, должны извлечь корень из некоторого выражения. Квадратный корень имеет два знака: плюс и минус, и мы, таким образом, получаем для каждого состояния электрона два значения энергии — положительное и отрицательное. Некоторое время это считалось уязвимой стороной реляти-

вистского волнового уравнения: отрицательная энергия — физически бессмысленное понятие. В поисках выхода Дирак предположил, что релятивистское волновое уравнение описывает поведение не только электрона, но и другой частицы, которая отличается от электрона знаком заряда: электрон имеет отрицательный заряд, а вторая частица — положительный. Она была названа позитроном. В 1932 г. позитроны были обнаружены в космических лучах, а вскоре после этого их получили в лаборатории, облучая вещество потоком фотонов. Позитроны, обладая противоположным по отношению к электрону зарядом, ведут себя так, как вел бы себя электрон с отрицательной энергией, но он обладает положительной энергией и, таким образом, волновое уравнение не приводит к физически бессмысленному понятию.

Оказалось, что фотоны — частицы, не имеющие массы покоя, превращаются в электронно-позитронные пары и, наоборот, электроны и позитроны — частицы с ненулевой массой покоя — могут превратиться в фотоны, т. е. в электромагнитное излучение. В свою очередь, фотон, если его энергия превышает миллион электронвольт, может превратиться в пару электрон — позитрон.

Превращение частиц с ненулевой массой покоя (и, соответственно, с ненулевой внутренней энергией) в частицу с нулевой массой покоя (ее энергия — это энергия движения, и вся масса — это масса, пропорциональная энергии движения) заставляет пойти дальше, сделать еще один шаг вперед — шаг очень важный, скорее, это уже не шаг, а скачок в развитии как теории относительности, так и квантовой механики. Первоначально теория относительности рассматривалась как теория макроскопических движений, ее обоснование исходило из мысленных и реальных экспериментов с макроскопическими объектами и макроскопическими движениями. Когда же речь шла о движении частицы, это представление тоже было в сущности макроскопическим по отношению к микроскопическим или, вернее, ультрамикроскопическим областям, в которых происходят трансмутации частиц. Вместе с тем и квантовая механика двинулась вперед, она включила в сферу своего внимания не только движение (с той или иной степенью определенности или неопределенности динамических переменных) тождественных себе частиц, но и трансмутации частиц, существование античастиц (такой

античастицей по отношению к электрону является позитрон), их встречи с частицами, аннигиляции пар частица — античастица и множество самых различных распадов и возникновений элементарных частиц различного типа.

Необходимое для описания подобных процессов объединение теории относительности и квантовой механики еще не достигнуто. Релятивистская квантовая физика решает пока только частные задачи, она еще не стала единой теорией, базирующейся на твердых непротиворечивых позициях, на общих исходных допущениях. Она не может решить такую задачу, как теоретическое объяснение эмпирически найденных масс покоя и других признаков, отличающих один тип элементарных частиц от другого.

Между тем решение подобной задачи стало чрезвычайно важным. Еще несколько десятилетий назад число известных типов элементарных частиц не превышало трех: были известны только электроны, протоны и фотоны, а сейчас трудно сказать, измеряется ли их число десятками или сотнями — само понятие элементарной частицы стало крайне неопределенным.

На подходе к единой теории элементарных частиц, которая объяснит спектр их масс, зарядов и других свойств, и раскроет тайну генезиса этих свойств, уже можно утверждать, что теория относительности и квантовая механика — это не параллельные дороги, они должны соединиться в одну. Но наука еще не достигла места, где они встречаются, и переход между ними реализуется пока через чуть видные поперечные тропинки. Поэтому физики так часто стремятся подняться над твердой почвой установленных фактов и оперировать гипотезами и прогнозами. Ведь дороги физики не направляют исследователя, он сам их прокладывает, сам ведет разведку и намечает трассу.

Что можно сказать о новой области физических процессов, при исследовании которой теория относительности сольется с квантовой механикой в единую теорию, стройную, непротиворечивую, обладающую и «внешним оправданием» и «внутренним совершенством»?

Достоверно известно немногое. Но для выяснения путей возможного (не неизбежного, даже не наиболее вероятного, а только возможного) обобщения принципа дополнительности это немногое может кое-что дать. Преж-

де всего, в той мере, в какой можно предвидеть будущее науки, изучение процессов в пространственно-временных областях порядка 10^{-13} см и 10^{-24} сек (может быть, на несколько порядков меньше), по-видимому, потребует более радикального отказа от классических понятий, чем тот, который имел место при появлении теории относительности и квантовой механики. Далее, эти радикально-неклассические соотношения должны будут при переходе к атомным и затем к макроскопическим масштабам приводить к квантовым соотношениям и к макроскопическим соотношениям теории относительности. Релятивистская причинность указывает, какие мировые линии могут соединять события, связанные как причина и следствие. Уже в атомных областях квантовая механика ограничивает понятие мировой линии, делает мировую линию размытой. В субатомных областях не исключена более радикальная неприменимость понятия мировой линии — даже размытой.

Иными словами, в субатомных областях царит иная причинность, которую можно, имея в виду характер происходящих здесь процессов, назвать ультрарелятивистской причинностью. В какой бы форме она не была найдена, ультрарелятивистская причинность должна при возрастании масштабов переходить в релятивистскую причинность.

Здесь мы оставим констатации и прогнозы, претендующие на некоторую достоверность, и перейдем к совсем не претендующим на нее более конкретным схемам. Они обладают только иллюстративным значением: неоднозначные картины могут иллюстрировать относительно вероятные тенденции.

В качестве такой иллюстрации допустим, следуя за Я. И. Френкелем, что частица может регенерировать, т. е. превращаться в частицу другого типа и затем, в следующем превращении, в частицу исходного типа¹. Может ли такое представление, как и всякое другое, кладущее в основу здания не элементарные перемещения (элементарные аристотелевы *φορά*), а трансмутации (элементарные аристотелевы *γενήσις* и *φθορά*), приводить к законам макроскопического перемещения?

¹ См.: «Доклады Академии наук СССР», 1949, т. 64, вып. 4, стр. 507; «Успехи физических наук», 1950, т. 42, вып. 1, стр. 69.

Элементарные трансмутации являются как бы порами в пространственно-временной картине мира, состоящей из мировых линий, тождественных себе и обладающих непрерывным движением элементарных частиц. Существование таких пор может стать исходным пунктом вывода макроскопической релятивистской причинности, если регенерация частицы, оставаясь непространственным понятием, в то же время фигурирует в пространственно-временной картине непрерывных движений в качестве элементарного сдвига, происходящего в течение элементарного времени.

Идея дискретного пространства, состоящего из далее неделимых клеток, как и идея дискретного времени, состоящего из далее неделимых длительностей, имеют долгую историю. Начиная с 40-х годов главное внимание при конструировании моделей дискретного пространства и времени обращали на согласование таких моделей с соотношениями теории относительности. Такое согласование нельзя считать невыполнимым. Беда, скорее, состоит в том, что перед исследователем лежат различные пути поисков согласования дискретности пространства и времени с теорией относительности, без критерия единственности данного пути в каждом случае.

В качестве примера представим себе, что регенерация частицы происходит в течение времени τ (порядка 10^{-24} сек), и новая частица оказывается на расстоянии ρ , равном τ , умноженному на скорость света c ($\rho = \tau c$, что дает величину порядка 10^{-13} см).

Мы сразу же можем заметить, что присвоение дискретным пространственно-временным клеткам указанных размеров в сущности некорректно. Дискретное пространство-время не обладает метрическими свойствами, мы можем здесь вести счет клеток, но внутри этих клеток не может быть никакого физического процесса, который бы позволил измерить расстояние между их границами. И ρ и τ представляют собой меры, которые не могут быть измерены. Таким образом, уже первое утверждение дискретной концепции предполагает существование противоречащей ему непрерывности пространства и времени, без которой величины ρ и τ теряют физический смысл.

Но это только начало прегрешений против разума, которые нас не смущают, поскольку мы уже услышали от Эйнштейна, что без них нельзя ничего узнать. Тип частицы физически определяется формой мировой линии,

ее кривизной (по ней можно узнать массу и заряд), ее длиной (время жизни), и без мировой линии понятия трансмутации и регенерации теряют смысл. Трансмутация физически означает *переход от одной эвентуальной мировой линии к другой эвентуальной мировой линии* (не только с другим коэффициентом пропорциональности между полем, действующим на частицу, и искривлением мировой линии, т. е. с иной массой, но и с иным коэффициентом пропорциональности между массой и скоростью, т. е. с иной, свойственной новой частице массой покоя и т. д.).

Таким образом, уже первое определение трансмутации и регенерации в дискретном пространстве-времени (минимальное расстояние, минимальная длительность, изменение типа частицы) вводит в качестве гарантии физического смысла, противоположное, отрицающее дискретность и трансмутации понятие непрерывной мировой линии себестождественной частицы.

До сих пор в классической, релятивистской и квантовой физике мы встречали подобное, необходимое для физической содержательности понятия, дополнение его противоположным понятием, когда речь шла о *движении* субъекта. Оно было предметом анализа и, чтобы движение имело физический смысл, нам нужно было указать субстанциальные свойства субъекта, его отличие от пространственного объема и пространственной точки. Теперь речь идет о *субъекте* движения, о подлежащем в констатации движения («что движется?»); но, чтобы приписать физическую содержательность возникновению и аннигиляции субъекта, нам нужно сослаться на его движение, на его эвентуальную мировую линию. Объектом анализа становится не поведение, а *локальное бытие* частицы; необходимой же опорой физического анализа становится ее эвентуальное пространственно-временное поведение, движение частицы в непрерывном пространстве в течение непрерывного времени.

В очень малых пространственно-временных областях, где движение тождественной себе частицы уступает роль основного объекта исследования трансмутационным ультрарелятивистским эффектам, принцип дополнительности динамических переменных, рассматриваемых в волновом и корпускулярном представлениях, модифицируется в *принцип бытия*, выражающийся во включении эвентуаль-

ных макроскопических определений в локальную характеристику частицы.

С этим принципом связан переход от ультрарелятивистской причинности к релятивистской. Уже в самых первых определениях тех «пор» в пространственно-временной картине непрерывных движений, где оказывается недостаточной макроскопическая, релятивистская причинность, уже в этих определениях содержится понятие мировых линий, т. е. понятие, фигурирующее во всех формулировках релятивистской причинности. Далее эти мировые линии превращаются в реальные. Возможность такого перехода мы проиллюстрируем следующей условной схемой.

Предположим, что частица не получает импульса. Тогда вероятности сдвигов ρ при регенерации будут для каждой частицы равны. Частица с одной и той же вероятностью в течение времени τ перейдет на расстояние, равное ρ , в любую сторону. Тогда, после большого числа регенераций-сдвигов частица окажется вблизи исходного пункта. Ее макроскопическая траектория будет близка к нулю, частица в макроскопическом смысле будет неподвижной. Теперь предположим, что в каком-то направлении сдвиги оказались вероятнее, чем в противоположном, т. е. в пространстве появилась диссимметрия сдвигов, которую мы можем отождествить с импульсом. Тогда, после большого числа сдвигов, частица сдвинется в сторону большей вероятности. Чем больше диссимметрия вероятностей, тем меньше статистический разброс сдвигов, тем в большей степени макроскопическая скорость частицы приближается к ее микроскопической скорости, т. е. к скорости света, которую она, естественно, не может превысить.

Нас интересует сейчас не эта схема, которая не претендует ни на что иное, кроме роли условной иллюстрации «принципа бытия». Здесь следует отметить ту же сквозную и неустранимую поляризацию физики на противоположные ряды понятий, исключаящие друг друга и вместе с тем теряющие один без другого смысл. Симметрия вероятностей — пространственное понятие, имеющее смысл только в том случае, когда в пространстве возможно различение направлений, а это в свою очередь требует физической различимости макроскопически движущихся тел и полей, т. е. диссимметризирующих физи-

ческих агентов. Симметрия вероятностей — это не только отрицательное понятие, это физическая характеристика, некоторая величина, от которой зависит мера статистического разброса сдвигов, без которой любой импульс приводил бы к равенству макроскопической скорости частицы и скорости света. Симметрию вероятностей сдвигов можно было приравнять к массе покоя и рассматривать ультрамикроскопические движения, соответствующие макроскопическому покою, как внутреннюю энергию частицы. С другой стороны, сами понятия макроскопической мировой линии, макроскопической траектории, макроскопической скорости потеряли бы физический смысл без заполняющих ультрамикроскопических процессов.

В заключение — вопрос о законности приведенных чисто логических конструкций. Нет ли здесь натурфилософской замены эксперимента саморазвитием понятий? На этот вопрос меньше всего можно ответить априорно, без анализа современной ситуации в теоретической и экспериментальной физике и без учета того, о какой логике и о каких понятиях идет речь.

Современная ситуация в физике характеризуется наряду с иными чертами предварительным продумыванием тех вопросов, которые будут заданы природе с помощью новой экспериментальной техники, в частности и в особенности, с помощью ускорителей, сообщающих частицам энергии в сотни миллиардов электронвольт. Быть может, эти вопросы окажутся в какой-то мере лишёнными смысла; не исключено, что переосмысление вопросов будет частью ответа. Среди множества гипотез, лишённых пока указаний на *experimentum crucis*, среди прогнозов, относящихся к контурам еще не созданной общей теории, было бы странно отказываться от логических конструкций, теснейшим образом связанных с теорией эксперимента.

Действительно, понятие дополнительности исходит из того, что физика оперирует экспериментально представимыми понятиями. Именно поэтому так необходимо «грешить против разума», вводя в теорию понятие прибора — тела, освобожденного от квантовой детализации, понятие эвентуальной мировой линии, которая только и может быть объектом эксперимента и, с другой стороны, так необходимо вводить понятие локального, ультрамикроскопического бытия, без которого мировая линия ста-

новится геометрическим понятием и не может быть объектом эксперимента.

Логика, оперирующая подобными понятиями,— это логика экспериментальной науки и уже поэтому она далека от натурфилософского анализа. В пятой главе этой книжки мы увидим, что соответствующий дополнительности логический алгоритм относится к логике бытия, к логике, которая меняет набор допустимых оценок («истинно», «ложно...») в зависимости от характера эксперимента.

4. Космос и микрокосм

Еще недавно учение о Вселенной считали чисто макроскопической теорией, в которой исходные закономерности подчинены установленному Эйнштейном общему принципу относительности. Об этом принципе было уже сказано несколько слов, а вскоре на нем придется остановиться подробнее. Нам уже известно, что общая теория относительности — это теория тяготения, теория гравитационных полей. Гравитационные взаимодействия настолько слабы по сравнению с электромагнитными и тем более с ядерными, связывающими между собой ядерные частицы, что в атомных и ядерных областях они не играют существенной роли. При известных сейчас плотностях вещества гравитационные поля играют существенную роль в макроскопических областях, а в космических они являются единственной известной нам причиной ускорений небесных тел.

Однако в последние десятилетия астрофизика все в большей степени рассматривает Вселенную не только как арену, на которой движутся под влиянием инерции и тяготения дискретные небесные тела. Астрофизика видит на этой арене различные волновые поля и, соответственно, потоки различных элементарных частиц. Их происхождение, их распад, их воздействие на атомы и атомные ядра связаны с судьбами небесных тел, с возникновением и гибелью миров и с их существованием — атомные и ядерные реакции гарантируют относительную устойчивость энергетического баланса звезд. Астрофизика и космология сближаются, и Вселенная представляется не столько упорядоченной системой тождественных себе

движущихся объектов, сколько совокупностью полей с возникающими, исчезающими, сжимающимися, расширяющимися и смещающимися средоточиями энергии, где массы дискретных тел являются только частью общей картины. Такая эволюция взглядов на Вселенную совпадает по направлению с внутренними тенденциями общей теории относительности: Эйнштейн понимал, что от нее нужно перейти к общей теории различных полей и различных по типу элементарных частиц. В свою очередь квантовая физика — теория микромира — также эволюционирует или по крайней мере стремится эволюционировать в сторону такой единой теории. Чтобы перейти к характеристике подобной тенденции, сближающей теорию микромира с общей теорией относительности, нужно несколько подробнее пояснить содержание последней.

Специальная теория относительности ограничена инерциальными системами — движениями без ускорения. Мировые линии, входящие в круг ведения специальной теории, — это прямые мировые линии. Только прямолинейные и равномерные движения не имеют внутренних критериев, изменений хода событий внутри движущейся системы. Только они не имеют смысла без тел отсчета. Ускоренное движение вызывает появление сил инерции в движущейся системе, и об ускоренном движении можно судить по внутренним эффектам, без ссылки на тела отсчета.

Подобное выделение инерциальных систем казалось Эйнштейну нелогичным, и он после создания специальной теории потратил много лет — вплоть до 1916 г., — чтобы распространить принцип относительности на ускоренно движущиеся системы.

Исходным пунктом такого распространения, исходным пунктом общей теории относительности был тот факт, что тяготение сообщает всем входящим в систему телам одно и то же ускорение, не зависящее от их масс. Действие тяготения не отличается от действия сил инерции, которые сообщают телам одинаковое, не зависящее от их масс ускорение, когда система движется ускоренно в противоположную сторону. Таким образом, различие между силами инерции при ускорении и гравитационными силами принципиально не может быть обнаружено. Эйнштейн предположил, что эти силы тождественны и состоят в искривлении пространства-времени.

Кривизну трехмерного пространства и тем более четырехмерного пространства-времени труднее представить себе, чем кривизну поверхности или линии. Но здесь можно обойтись без наглядного представления. Как известно, фигуры, нарисованные на поверхности сферы, т. е. на поверхности постоянной ненулевой кривизны, подчиняются не геометрии Эвклида для плоскости, а другой, неевклидовой, римановой геометрии, в которой сумма углов треугольника больше двух прямых углов, и мера расстояния, т. е. метрика пространства, иная: квадрат расстояния между двумя точками не равен сумме квадратов разностей координат этих точек. Если такие неевклидовы соотношения, такая метрика наблюдаются в трехмерном пространстве или в четырехмерном пространстве-времени, мы можем это интерпретировать по аналогии как искривление пространства или пространства-времени. Тогда движение с ускорением можно рассматривать как движение по инерции, по кратчайшим мировым линиям; по кратчайшими линиями в искривленном пространстве-времени будут кривые линии, тогда как в неискривленном пространстве-времени, т. е. в отсутствие гравитационных полей, кратчайшими мировыми линиями были прямые.

Тяготение, иначе говоря искривление пространства-времени, зависит от расположения центров тяготения, к которым, согласно общей теории относительности, принадлежит всё, что обладает энергией и импульсом, в частности, все поля, поскольку они обладают энергией. Распределение энергии-импульса в пространстве-времени описывается величиной, которая называется тензором энергии-импульса. В основном уравнении теории тяготения Эйнштейна, в его левой части, находятся величины, характеризующие кривизну пространства-времени, а в правой — тензор энергии-импульса. Эта последняя величина не получила отчетливой физической расшифровки. Она описывает не только гравитационные поля, как это делают величины, характеризующие кривизну и стоящие в уравнении слева, а все поля, поскольку все они влияют на кривизну пространства и покрываются значением тензора энергии-импульса. Физическая расшифровка этого тензора возможна только в теории, объясняющей происхождение и распространение всех полей, в единой теории полей.

Эйнштейн в течение тридцати лет безуспешно стремился создать такую теорию, но она и поныне является идеальной «целевой функцией» (это применение эконометрического термина по отношению к физике, как мы увидим дальше, совсем не случайно) современной физики. Поэтому Эйнштейн пошел и здесь на «грех против разума» и рассматривал причину искривления пространства-времени как некоторую нерасчленную реальность.

Из всех ее составляющих объектом наблюдения оказывалась только одна компонента — распределение в пространстве тяжелых масс, притягивающих другие тела и, таким образом, участвующих в искривлении пространства-времени. Если принимать во внимание лишь этот каркас дискретных тел и, таким образом, в некоторой мере отказаться от полевой концепции (от представления о непрерывно распределенной в пространстве и меняющейся от точки к точке энергии), то движение по инерции можно считать результатом воздействия всех этих образующих Вселенную дискретных тел. О таком взгляде следует сказать подробнее.

Около ста лет тому назад Мах в книге «Механика. Историко-критический очерк ее развития» отказался от ньютонова понятия абсолютного пространства. Ньютон объяснял силы инерции ускорением, отнесенным к абсолютному пространству. Мах считал силы инерции аналогичными всем другим силам — результату взаимодействия тел — и объяснял их воздействием небосвода в целом, всей совокупности небесных тел.

Концепция Маха фигурирует сейчас в науке в том обобщенном и уточненном виде, который придал ей Эйнштейн: поскольку взаимные смещения звезд происходят с очень малой скоростью, не сопоставимой со скоростью распространения взаимодействий, можно рассматривать совокупность звезд как неподвижный звездный газ, отнести инерционное движение к системе отсчета, в которой этот газ неподвижен, и считать действие этого газа причиной сил инерции.

Пример Ньютона — во вращающемся ведре вода под влиянием центробежных сил поднимается к краям, в неподвижном ведре она не испытывает воздействия этих сил — Мах объясняет исходя из относительности всякого движения. «Опыт Ньютона с вращающимся сосудом» показывает то, что относительное вращение воды по отно-

шению к *стенкам сосуда* не пробуждает заметных центробежных сил, но что эти последние пробуждаются относительным вращением по отношению к массе Земли и остальным небесным телам», — пишет Мах.

Инерция, продолжает он, отнесена к неподвижным звездам, вообще к совокупности тел, образующих мир: «если мы говорим, что тело сохраняет свое направление и скорость в *пространстве*, то в этом заключается только краткое указание на то, что принимается во внимание *весь мир*». Эта фраза должна быть интерпретирована как переход от совокупности дискретных тел, образующих Вселенную, к натянутому на эти тела пространству, к системе отсчета, в которой звездный газ в целом неподвижен.

Объяснение сил инерции воздействием звездного газа — совокупности небесных тел — Эйнштейн назвал «*принципом Маха*».

Какая позиция по отношению к принципу Маха вытекала из наиболее общих идей Эйнштейна?

Эйнштейн называл *программой Ньютона* классический идеал науки — такое каузальное описание мира, в котором все объясняется взаимодействием тел, в свою очередь зависящим от их положения, от пространственного распределения масс и от их скоростей. Чтобы выполнить эту программу (ей противоречило абсолютное пространство как причина сил инерции), нужно было отказаться от основ ньютоновой механики. Общая теория относительности казалась выполнением программы Ньютона, но впоследствии выяснилось, что она не укладывается в эти рамки и это связано с ее *полевым* характером. Обобщение классической теории поля Эйнштейн называл *программой Максвелла*. Программа Ньютона и программа Максвелла оказались несогласуемыми без ряда совершенно новых понятий, которые позволили явственно продемонстрировать несовместимость принципа Маха и последовательного обобщения полевой концепции.

Возможно ли с помощью полевых понятий обойтись без отдаленных масс как источников поля сил инерции, как тел, притягивающих воду к краям вращающегося ведра? Можно ли отказаться от воздействия отдаленных масс при объяснении сил инерции? Можно ли в теории тяготения, ускоренного движения и сил инерции ссылаться на процессы, не сводимые к изменению пространствен-

ного расположения масс и вместе с тем не относить ускоренное движение к самому пространству?

В сущности именно такова тенденция общей теории относительности. В этой теории гравитационное поле зависит от тензора энергии-импульса. Последний описывает распределение энергии, средоточие энергии — всю совокупность агентов, воздействующих на кривизну пространства-времени. Иногда задают вопрос, может ли вызвать вращение однородного шара или кольца какой-либо физический эффект, ведь такое вращение не меняет ориентации вращающегося тела по отношению к другим телам. Но вращение однородного шара или кольца меняет распределение энергии, и такое изменение может дать определенный физический эффект. Эддингтон считает такой эффект противоречащим принципу Маха. Он формулирует этот принцип так: «Все механические явления могут быть в конечном счете сведены к относительному положению и к изменениям положения масс во всем мире». С такой точки зрения вращение без изменения относительной ориентировки масс не может быть причиной физических явлений и не может обладать физическим смыслом. Но понятие тензора энергии-импульса не согласуется с таким взглядом. «В рамках теории относительности это воззрение представляется совершенно нелогичным, так как для этой теории плотность массы является только одной из компонент тензора энергии, и было бы неправильно одну определенную компоненту считать единственной сущностью, обуславливающей явление»¹.

Эддингтон рассматривает кольцо, состоящее из однородного и непрерывного вещества и вращающееся как колесо по отношению к окружающим массам. По сравнению с неподвижным кольцом вращающееся кольцо не создает какого-либо иного распределения масс, вращение не состоит в каком-либо изменении взаимной ориентации тел. Тем не менее могут существовать физические эффекты вращения, поскольку распределение энергии изменяется при вращении кольца по сравнению с его покоем.

В 1916 г., излагая общую теорию относительности, Эйнштейн говорил, что ньютоново объяснение сил инерции ускорением по отношению к абсолютному пространству не является подлинно причинным объяснением: движе-

¹ А. Эддингтон. Теория относительности. М.—Л., 1934, стр. 315.

ние по отношению к пустому пространству *в принципе* не может быть наблюдаемо, а «принцип причинности только тогда имеет смысл суждения о явлениях в мире нашего опыта, когда в качестве причин и следствий в конечном итоге оказываются лишь факты, могущие быть наблюдаемыми»¹.

Требование принципиальной наблюдаемости процессов, фигурирующих в качестве причин и следствий, иначе говоря, требование физической содержательности исходных и конечных понятий, сохраняется в физике только потому, что оно модифицируется, потому что понятие принципиальной наблюдаемости меняется. В свое время принципиально наблюдаемыми считались процессы, однотипные с поведением макроскопических тел, а последние считались непосредственно воздействующими на органы чувств. Но классической физике и классической физиологии стало известно, что на зрение действуют электромагнитные волны; стали известны и другие факты, заставившие расширить сферу принципиально наблюдаемого. Представим себе, что причиной некоторых наблюдаемых явлений служат электромагнитные волны. Разумеется, они обладают принципиальной наблюдаемостью не в меньшей степени, чем взаимные перемещения тел. Подобные процессы описываются компонентами тензора энергии, теми компонентами, которые не учитываются представлением об изменении взаимной ориентировки тел как о единственной причине физических эффектов.

«Полевое» представление о Вселенной, учет всех компонент тензора энергии, противоречит «принципу Маха». Именно поэтому Эйнштейн в конце концов отказался от этого принципа. В 1949 г. в автобиографическом очерке он писал о концепции Маха: «Это мнение я долгое время считал в принципе правильным. Оно неявным образом предполагает, однако, что теория, на которой все основано, должна принадлежать тому же общему типу, как и ньютонова механика: основными понятиями в ней должны служить массы и взаимодействия между ними. Между тем нетрудно видеть, что такая попытка решения не вяжется с духом теории поля»².

¹ А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I, стр. 455.

² А. Эйнштейн. Там же, т. IV, стр. 268—269.

Во всех этих вопросах звучит в сущности одна и та же констатация. Ее можно сформулировать с помощью некоторой исторической аналогии.

Ньютон не мог достичь *классического идеала* — того, что Эйнштейн назвал «программой Ньютона». По ряду причин Ньютон должен был отнести силы инерции не к телам, а к пустому пространству и ввести понятия абсолютного движения и абсолютного пространства. Многие мыслители, начиная с современников Ньютона, в том числе Гюйгенса и Лейбница, понимали незаконность этих понятий. Но последние могли быть исключены только на основе новых представлений, и классический идеал восторжествовал ценой таких обобщений, которые таили радикальный отказ от этого идеала как исходного принципа науки.

Аналогичным образом Эйнштейн не имел возможности реализовать то, что можно было бы назвать «программой Эйнштейна» и что включало отказ от принципа Маха. Многие физики (в том числе сам Эйнштейн в автобиографическом очерке 1949 г.) понимали незаконность включения принципа Маха в число постулатов общей теории относительности как теории поля. Но так же как в классической физике критика абсолютного пространства не привела в течение двух с половиной веков к исключению этого понятия из физики, так же критика принципа Маха в релятивистской физике не привела (пока не привела и, разумеется, тут не потребуются двух с половиной столетий) к космологической теории, однозначно исключающей этот принцип. Не привела, несмотря на наличие логически безупречных аргументов, не менее сильных, чем аргументы против абсолютного пространства, выдвигавшиеся с 1687 г. («Математические начала натуральной философии») до 1916 г. («Основы общей теории относительности»).

Принципу Маха противостоит теория относительности как *полевая теория*. Но является ли она уже сейчас полностью полевой?

Такая теория относительности была для Эйнштейна идеалом (как для Ньютона могла бы быть идеалом, а для классической механики в целом действительно была идеалом, схема мироздания, состоящего только из взаимодействующих материальных точек), а не достигнутой позицией.

По отношению к чистолевой теории, которой может быть только единая теория поля, общая теория относительности служит предварительным, вынужденным по своему ограниченному характеру построением. В автобиографии 1949 г. Эйнштейн рассказывает, как он пришел к общей теории относительности, и, в частности, говорит об ограничении анализа первоначальной задачей. Он рассматривает два случая: чистое поле тяготения и «общее», как его называет Эйнштейн, поле, включающее электромагнитные силы.

«Попытка найти представление для полного поля и получить для него уравнения казалась мне в то время бесперспективной и я на нее не отважился. Я предпочел установить для изображения всей физической реальности предварительные формальные рамки. Это было нужно для того, чтобы иметь возможность исследовать, хотя бы предварительно, пригодность основной идеи общей относительности»¹.

В единой теории поля компонента тензора энергии-импульса, описывающая распределение масс, как бы растворяется в полевым представлении, и изменения тензора в целом становятся описанием процессов, несводимых к перегруппировке материальных точек. Эйнштейн думал о гравитационном и магнитном поле. Сейчас проблема единого поля неотделима от взаимодействия множества полей, трансмутации элементарных частиц, выведения значений масс и других признаков каждого типа частиц из некоторых общих принципов и допущений.

Полевое представление о Вселенной, представление, которому противоречит принцип Маха и к которому стремился Эйнштейн, не означает сейчас чисто континуальной концепции. Но оно несовместимо и с чисто дискретной концепцией типа звездного газа. Сейчас полевое представление не может быть сформулировано без понятия дополненности локальных и макроскопических объектов и процессов. Принцип Маха именно потому и противоречит современным тенденциям теории поля, что он находится вне подобной дополненности. Можно ли говорить о воздействии космических объектов на локальные, микроскопические или ультрамикроскопические, в рамках концепции дополненности?

¹ А. Эйнштейн. Физика и реальность, стр. 158.

Решение этой проблемы может быть только конструктивным, оно должно состоять в построении физической теории, связывающей структуру космоса с существованием и поведением частиц, т. е. с их *бытием*. В теории элементарных частиц существуют такие тенденции. Одной из иллюстраций может служить концепция «зашнуровки» (bootstrap), как Чу и Фраучи назвали свою гипотезу о существовании частицы как результате ее взаимодействия с другими частицами¹. Последние сами зависят от взаимодействия с данной частицей. Таким образом, перед нами нелинейная концепция взаимодействия элементов самосогласованной системы, существование которой выражается в таком взаимодействии.

Сейчас подобные концепции — их уже немало — еще не могут претендовать на конструктивное решение проблемы воздействия космоса на микрокосм. Можно думать, продвижение на этом пути будет происходить в русле дополнительности локального существования и макроскопического поведения частиц, в русле объединяющего эти определения понятия бытия частиц. Чтобы иллюстрировать возможность такого направления, мы вернемся сейчас к условной модели симметрии и диссимметрии вероятностей сдвигов частицы в клетках дискретного пространства-времени.

В предыдущей главе уже говорилось, что симметрия вероятностей — это позитивная характеристика, это определенная для каждого типа частиц интенсивность сопротивления диссимметризирующим агентам, это свойственная частице инертность, это масса покоя частицы. Как объяснить такую динамическую определенность симметрии?

Ответственными за диссимметрию мы считаем локальные импульсы, соответствующие неравномерностям в распределении энергии в пространстве. Но какой фактор ответствен за *симметрию*?

Естественной представляется мысль об однородном распределении энергии как о факторе, вызывающем определенную степень, определенную интенсивность симметрии у каждого типа частиц, иначе говоря, о Вселенной в тех масштабах, где локальные неоднородности, вплоть до расстояний между скоплениями галактик, оказывают-

¹ G. F. Chew, S. C. Frautschi. «Phys. Rev.», 1961, v. 7, p. 394.

ся пренебрежимо малыми. Такое предположение соответствует — лучше сказать, не противоречит — некоторым моделям Метагалактики, в особенности замкнутым моделям.

Метагалактическое поле измеряется не каким-либо вектором, а скаляром — значением массы. Это объясняется его полной изотропностью: в любом направлении частице противостоит одна и та же «толща» действующей на частицу Метагалактики. Такая изотропия гарантирует симметрию вероятностей элементарных сдвигов и скалярный характер эффекта метагалактического поля.

Можно было бы предложить космологические гипотезы, вытекающие — далеко не однозначным образом — из идеи дополнительности диссимметрии вероятностей регенераций, обязанной локальным полям, и симметрии вероятностей, обязанной изотропному метагалактическому полю. Но нет смысла уходить в сторону от основной задачи уже высказанных гипотез — демонстрации логической возможности такой модели мира, которая сохраняет для космических масштабов принцип воздействия макроскопических условий на локальные процессы и вместе с тем отказывается от схемы небесных тел с натянутой на них системой отсчета, к которой отнесена инерция небесных тел, вызывающих своим воздействием силы инерции. Если ссылаться на воздействие Метагалактики, имея в виду не отдаленные тела, а однородное скалярное поле, то мы остаемся в рамках полевого представления, мы рассматриваем непрерывное от точки к точке воздействие Метагалактики на элементарные частицы.

Вкратце повторим высказанные соображения.

Принцип Маха может быть отождествлен с тезисом о зависимости геометрической структуры мира — кривизны мировых линий — от тензора энергии-импульса в том случае, если из всех компонент указанного тензора принимать во внимание только компоненту, описывающую взаимную ориентировку дискретных масс. Напротив, полевая концепция мира стремится по своим тенденциям рассматривать в качестве исходных процессов мироздания процессы, которые не входят в концепцию Маха. Поэтому Эйнштейн в итоговой характеристике теории относительности отказался от принципа Маха. Однако «полевая» тенденция теории относительности может быть завершена только в единой теории поля, подобно тому как

программа Ньютона (объяснение всех процессов взаимодействием тел) могла быть выполнена лишь при коренном изменении теории. Как бы ни был неполноценен принцип Маха в качестве существенной посылки общей теории относительности, Эйнштейн был вынужден им пользоваться, так же как неполноценным по его признанию тензором энергии-импульса в уравнении гравитационного поля, так же как компромиссным ограничением теории только гравитационным полем. Весьма общим, может быть, наиболее общим, принципом дальнейшего развития теории относительности в направлении к единой теории поля будет, по-видимому, постулат Эйнштейна: поведение отдельных физических объектов, их мировые линии, геометрическая структура мира определяются всей материей мира. Этот постулат объединяется с принципом дополнительности макроскопического, континуального аспекта и ультрамикроскопического, локального аспекта мироздания. Первый из названных принципов является обобщением зависимости кривизны пространства-времени от тензора энергии-импульса; второй — обобщение принципа дополнительности волнового и корпускулярного представления, как он был сформулирован при обосновании квантовой механики. Указанное обобщение исходных идей теории относительности и квантовой механики было связано со все более отчетливым полевым характером той и другой теории, с переходом от специальной теории относительности к общей, превратившей жесткие каркасы отсчета в меняющиеся от точки к точке по метрическим свойствам «моллюски отсчета», а в квантовой механике — с переходом к релятивистской квантовой теории, которая противопоставляет квантовому объекту не жесткое тело взаимодействия, а квантованное поле и тем самым заставляет обобщить принцип дополнительности. Материя мира определяет не только каркас мировых линий, но и заполняющие эти мировые линии ультрамикроскопические события, связанные с мировыми линиями соотношением дополнительности: мировые линии не имеют физического смысла, физического бытия, без ультрамикроскопических процессов, которые являются физически бессодержательным понятием без эвентуальных мировых линий. Эту дополнительность можно проиллюстрировать схемой дискретного пространства-времени, в ячейках которого исчезают и появляются элементарные частицы; иначе говоря, изменя-

ются эвентуальные мировые линии, без которых нельзя говорить о массе, заряде, спине — свойствах, характеризующих тип частиц, — и без которых понятие трансмутации теряет смысл. Принцип дополнительности определений мировых линий и ультрамикроскопических процессов позволяет придать последним физический смысл. Мы идентифицируем частицу определенного типа, т. е. частицу с определенной эвентуальной мировой линией, появившуюся в клетке дискретного пространства-времени, с частицей того же типа, исчезнувшей в соседней клетке. Таким образом, вводится понятие элементарных сдвигов-регенераций. Если в заданном пространстве направления этих сдвигов имеют одну и ту же вероятность, мы получаем частицу, возвращающуюся после большого числа случайных блужданий к исходному пункту, частицу с нулевой макроскопической траекторией и нулевой макроскопической скоростью. Если же существует диссимметрия вероятностей сдвигов-регенераций, то частица будет иметь ненулевую макроскопическую скорость, не превышающую, конечно, скорости движения в одном направлении без статистического разброса, т. е. скорости, равной частному от деления пространственной линейной протяженности клетки на время регенерации, на временную длительность. Очевидно, статистический разброс пространственных направлений элементарных сдвигов делает макроскопическую скорость меньшей, чем ультрамикроскопическая скорость, равная скорости света. Мы ассоциируем этот разброс, макроскопически выражающий пространственную симметрию вероятностей регенераций, с массой частицы. Диссимметризирующие импульсы, заставляющие частицу двигаться с той или иной скоростью, не превышающей скорости света, мы приписываем локальным полям. Симметрию вероятностей регенераций мы приписываем воздействию однородной Метагалактики. Таким образом, и мировые линии и заполняющие их, придающие им физическое бытие, ультрамикроскопические процессы зависят от материи космоса.

Речь идет о *материи космоса* отнюдь не в ограниченном смысле совокупности небесных тел, а о более общем и точном понятии, охватывающем все частицы и, соответственно, все поля, все средоточия энергии, всё описываемое *всеми* компонентами тензора энергии-импульса.

Подобная схема является историко-физической моделью; она не претендует ни на что большее, чем возможность охарактеризовать современное «локальное» состояние проблемы с помощью «эвентуальной» конструкции, показывающей логическую допустимость замены принципа Маха другим, полевым по своему характеру принципом.

Такая замена представляется весьма радикальным преобразованием картины мира. Принцип Маха — это выражение классического идеала науки, объяснения всех явлений взаимодействием неизменных, тождественных себе масс. Отказ от этого принципа — фундаментальный антиклассический поворот научной мысли. Принципу Маха не противостоит еще какая-то новая физическая концепция Вселенной, но ему противостоит уже наметившаяся тенденция рассматривать Вселенную как спинозовскую *causa sui*, взаимодействующую с собой через воздействие Метагалактики на частицы, неотделимое по своему физическому смыслу от локальных воздействий на их поведение.

5. Логические аспекты принципа дополненности

Вскоре после того, как Бор изложил принцип дополненности, некоторые ученые попытались переформулировать исходные логические операции так, чтобы квантовая механика приобрела менее парадоксальный характер. Основные предложения были связаны с увеличением числа различных оценок, которые можно приписать высказываниям. В классической так называемой бивалентной (двухзначной) логике применяются две оценки: «истинно» и «ложно». Первая обычно обозначается через *R*, а вторая через *F*. Квантовые логики, появлявшиеся в 30—40-е годы, включали по большей части наряду с двумя указанными оценками третью: «неопределенно» (*W*) — они были тривалентными (трехзначными). Были и более сложные системы реформированной, квантовой логики¹.

¹ См.: Б. Г. Кузнецов, Пути развития квантово-релятивистской логики, — («Труды Института истории естествознания и техники Академии наук СССР», т. XXII, 1959).

Нильс Бор говорил, что реформа логики будет ненужной, и квантовая механика окажется логически непротиворечивой в рамках обычной логики, если придавать терминам «явление» и «измерение» физически содержательный смысл: явление — это нечто по своей природе допускающее однозначную информацию, а измерение — это сравнение с некоторым эталоном¹. Мысль Бора стремилась вывести квантовую механику из возможно более общих посылок. Но эти посылки были не логическими, а физическими. Бор по существу развивал идею *физической аксиоматизации*.

При аксиоматизации геометрии ищут исходные, независимые одно от другого утверждения, из которых можно с помощью одного и того же логического алгоритма получить непротиворечивую систему выводов.

В случае физической аксиоматизации ищут исходные понятия и утверждения, позволяющие вывести заключения, не только логически непротиворечивые, но и имеющие онтологическую ценность, соответствующие действительности. Такое соответствие устанавливается экспериментом. Логика не отличается от математики, о которой Бертран Рассел сказал, что она никогда не знает, в чем состоят ее утверждения, и никогда не знает, справедливы ли они. Напротив, физика — в этом ее основное отличие от логики и от математики — придает своим утверждениям онтологическую ценность, которая гарантируется экспериментом. При физической аксиоматизации формулируют условия однозначного ответа на вопрос, соответствует ли физическое утверждение объективной действительности.

Физической аксиоматикой были ньютоновы «Правила умозаключения в физике» (*Regulae philosophandi*) в третьей книге «Математических начал натуральной философии». К физической аксиоматике принадлежало условие, поставленное Эйнштейном, — о движении можно говорить как о чем-то действительно происходящем, если представить себе тело отсчета, т. е. систему градуированных линеек, с которыми соприкасаются движущиеся тела. Условие Бора — явление, о котором идет речь в физике, должно допускать однозначную информацию — это также элемент физической аксиоматизации. Из физических аксиом с помощью тех или иных логических и математических алгоритмов выводят описания явлений, проверяемые экспериментом и наблюдением и, таким образом, приобретающие

¹ См.: Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961, стр. 145.

онтологическую ценность. Исходные аксиомы антиципируют экспериментальную проверку и в ней — гарантия их физического характера, их онтологической ценности.

Второе условие Бора — измерение предполагает существование эталона — означает, что для измерения необходим объект, которому мы приписываем неизменные, не меняющиеся в процессе измерения параметры (например, неизменное положение всех частей или неизменяющуюся при взаимодействии реакцию на импульс). Иначе говоря, при измерении неизбежно разграничение измеряемого объекта и измеряющего прибора.

Эти условия позволяют перейти от неопределенных суждений о событиях и процессах к определенным суждениям, т. е. оперировать только двумя оценками «истинно» и «ложно». Именно поэтому условия Бора позволяют изложить квантовую механику непротиворечивым образом в рамках классической, бивалентной логики.

Однако сами эти условия выходят за указанные рамки. Более того, они выходят за рамки формальной логики, не претендующей на онтологический характер своих операций. И они выходят за рамки любой логики с некоторым неизменным числом оценок. Но в рамках нерелятивистской квантовой механики обо всем этом можно и не упоминать и не обращать внимания на обобщение логического алгоритма, с которым связаны условия Бора.

Дело в том, что в нерелятивистской квантовой механике постулируется существование макроскопического эталона с неизменными предикатами — тела взаимодействия, с помощью которого производится измерение и получаются однозначные (т. е. в принципе сколь угодно точные) сведения о данной динамической переменной частицы. Напротив, в релятивистской квантовой физике противостоящий измеряемому объекту измеряющий эталон, прибор, уже не представляется заведомо классическим объектом, он оказывается полем, квантово-дискретную природу которого уже нельзя просто игнорировать. Теперь нужно вводить «грех против разума» в явной форме и отдавать себе отчет в его логической природе.

Несколько аналогичная картина наблюдается при анализе математической стороны теории относительности, при анализе отношения этой теории к геометрии. Теория относительности может быть сформулирована в рамках обычной геометрии и так она и была первоначально сформули-

рована. Ее физические постулаты *implicite* содержали псевдоевклидову четырехмерную геометрию. Но пока теория ограничивалась инерциальными системами, евклидов характер четырехмерного континуума можно было бы не оговаривать. Когда же появилась общая теория относительности, новый характер геометрии стал явным. Общая теория относительности указывает условия, при которых можно обойтись евклидовыми соотношениями. Геометрия приобретает переменную аксиоматизацию, евклидов постулат оказывается предпосылкой геометрических выводов или уступает эту роль постулатам Римана или Лобачевского, в зависимости от физических условий, позволяющих игнорировать гравитационное поле или же учитывать его и приписывать ему тот или иной характер.

Вместе с тем геометрия — ее исходные постулаты — приобретает явный онтологический, физический характер. Возникает физическая геометрия, указывающая, в каких областях, при описании каких процессов и объектов требуется та или иная по мероопределению (определению расстояний как функций координат) геометрия.

Отношение квантовой механики к логике несколько аналогично отношению теории относительности к геометрии. Если физическая геометрия — констатация явной зависимости геометрического алгоритма от физической задачи — дала толчок не только физике, но и самой геометрии, открыв новые пути ее применения как в физике, так и вне ее, то «физическая логика» — констатация явной зависимости логического алгоритма от физических постулатов — оказалась необходимой не столько для квантовой механики, сколько для самой логики. Если в геометрии выросло представление о переменной (евклидовой, в отсутствие тяготения и переходящей в неевклидову при учете тяготения) метрике, то в логике квантовая механика вызывает идею переменной валентности — перехода от трех оценок («истинно», «ложно», «неопределенно») к двум («истинно» и «ложно»). Такой переход мы будем называть тривалентно-бивалентным переходом и, оставляя в стороне оценку «ложно», обозначим его символом $W \rightarrow R$.

Именно в таком переходе состоит эксперимент. Он превращает неопределенное значение физической переменной (в частности, информацию о ее вероятности) в однозначное. Для эксперимента в атомной физике характерно разграничение процессов, происходящих в приборе и обладаю-

щих достоверной оценкой R , и процессов, субъектом которых служит частица, динамические переменные которой подвергаются измерению и до этого могут быть определены лишь с помощью неопределенной оценки (в частности, информации о вероятности, полученной с помощью волнового уравнения).

Эксперимент в узком смысле не исчерпывает тривалентно-бивалентного перехода $W \rightarrow R$. Такой переход может реализоваться двумя основными путями. Предположим, что некоторый процесс не дает однозначной (\bar{R} или F) информации, позволяющей предвидеть результат другого такого же процесса. Бросание монеты — классический пример такого процесса — не дает нам оснований утверждать, что при следующем бросании монета упадет той же стороной. Подобные процессы называются испытаниями. Каждое бросание монеты, каждое испытание не дает результата, заранее определенного исходным состоянием монеты. Исходное состояние определяет лишь вероятность падения монеты на одну из ее сторон. Эти вероятности равны. Они могут превратиться в достоверность, если мы изменим вопрос и будем выяснять, какое число выпадений, например, герба будет зарегистрировано при очень большом общем числе испытаний. Тогда теоретический вывод — вероятность равна половине — может быть проверен испытаниями: при тысяче бросаний монеты число выпадений герба практически не будет отличаться от пятисот, а при еще большем числе испытаний результат еще более точно будет соответствовать вероятности, мы получим при этом достоверное заключение о числе выпадений (т. е. приблизимся к оценке R).

Таким методом исключения неопределенности и перехода к достоверности пользуются статистические теории: теория тепла (макроскопический закон перехода тепла от горячего тела к холодному с достоверностью подтверждается экспериментом, поскольку в нем участвуют миллионы молекул), теория естественного отбора (приспособление к среде не определяет судьбу индивида, но определяет эволюцию вида, судьбу большого, статистически репрезентативного множества особей), демографическая и экономическая статистика.

Другой путь ($W \rightarrow R$)-перехода состоит в таком изменении условий единичного процесса с неопределенным заранее результатом, чтобы исключить неучитываемые

воздействия на ход процесса. В этом случае испытание называется *единичным экспериментом*. В таком эксперименте рассматриваются два множества предикатов. Одно из них состоит из предикатов *прибора*, другое — из предикатов исследуемого квантового *объекта*. Между этими многообразиями существует соответствие, способное в принципе сколь угодно приблизиться к однозначному. Постулируется, что каждому элементу «приборного» многообразия (например, положению каждой точки на поверхности диафрагмы или — другой пример — каждому отклонению дверцы) соответствует один, и только один, элемент «объектного» многообразия (например, только одно положение электрона, когда он попадает на поверхность диафрагмы, или только одно значение импульса, когда электрон толкает дверцу). Вопрос, который должен быть разрешен экспериментом, состоит в следующем: обладает ли исследуемый объект предикатом, который взаимно-однозначно соответствует данному предикату прибора, причем такое соответствие определено заранее состоянием объекта, так что другой объект будет обладать тем же предикатом при повторении всех известных нам условий. Высказывание о таком соответствии может получить оценку «истинно» либо «ложно». Отверстие в диафрагме означает, что вопрос задан о координатах, точки, где находится это отверстие. Соответствует ли этому заранее заданному значению координат определенное предшествующими событиями положение электрона в тот момент, когда он проходит сквозь диафрагму? Если электрон обнаружен по другую сторону диафрагмы, значит мы должны присвоить высказыванию о координатах электрона (о соответствии положения электрона координатам точки, где находится отверстие) оценку *истинно*. Если электрон не обнаружен, присваивается оценка *ложно*.

Если в диафрагме нет отверстия, она будет играть роль экрана и можно, сделав этот экран сцинтиллирующим, регистрировать попадание электрона на экран. В этом случае мы получим точное значение положения электрона в момент сцинтилляции, но это значение не связано однозначно с какой-то заранее заданной точкой на экране: следующий электрон при неизменных известных нам условиях может и не попасть в ту же точку. С заранее заданной точкой связана лишь некоторая вероятность попадания электрона в эту точку и при большом числе электронов их

распределение на экране будет соответствовать вероятности. Следовательно, сцинтилляции электрона — это *испытания* того же типа, что и выпадение герба или решки при бросании монеты. Это — первый из рассмотренных нами путей ($W \rightarrow R$)-перехода.

Вспомним теперь о дополнительной мировой линии частицы и ее локального бытия. Последнее проявляется в воздействии определения положения электрона на определенность его импульса. Если для положения электрона реализуется ($W \rightarrow R$)-переход через *единичный эксперимент*, то для импульса остается только ($W \rightarrow R$)-переход первого типа через множество *испытаний*, приводящих массовый результат к соответствию с вероятностью.

Если рассматривать *единичный процесс*, то он является *экспериментом* для одной из сопряженных переменных, т. е. он достаточен для его достоверного определения, для ($W \rightarrow R$)-перехода к достоверному значению этой переменной. Для другой, сопряженной переменной этот *единичный процесс* является *единичным испытанием*, а *единичное испытание* недостаточно для ($W \rightarrow R$)-перехода.

Когда речь идет о квантовой механике, мы можем обойтись без логических псевдонимов. Здесь неопределенность переменной отдельного электрона, иначе говоря, информация о его вероятности, связана с волновым аспектом, а определенность сопряженной переменной — с корпускулярным аспектом, и логические псевдонимы ничего не прибавляют к тому, что нам известно. Но для обобщения принципа дополнительной и его применения вне квантовой механики следует подчеркнуть логический принцип *дополнительности тривалентно-бивалентного перехода через единичный эксперимент и тривалентно-бивалентного перехода через статистически репрезентативное число испытаний*.

Эта логическая схема применима во всех случаях, когда нужно получить информацию об объекте, состояние которого характеризуется переменными, аналогичными положению и импульсу частицы. Чтобы проиллюстрировать применимость понятия дополнительной вне физики, — применимость, о которой говорил в свое время Бор, — нужно показать, что переменные, характеризующие состояние этого объекта, действительно аналогичны положению и импульсу частицы.

Под аналогией здесь понимается весьма простое и известное уподобление переменных самой различной приро-

ды геометрическому пространству. Мы берем набор переменных, значения которых характеризуют состояние объекта. Эти переменные мы рассматриваем как координаты точки, изображающей состояние. Если число n таких координат больше, чем три, это нас не смущает; перед нами n -мерное пространство состояний. Переход из одного состояния в другое описывается кривой в n -пространстве. Если мы хотим описать скорость такого перехода, мы вводим еще одно измерение — время, и угол, образуемый кривой в $(n + 1)$ -мерном пространстве к оси времени, покажет нам скорость изменения состояний, динамическую картину изучаемых явлений.

В следующей главе этой книжки мы увидим, что такая схема помогает понять некоторые стороны современной экономики и сформулировать некоторые понятия экономической науки. Последняя стала сейчас весьма точной дисциплиной. Поэтому проблема измерения и получения точной информации здесь оказалась весьма существенной. Экономическая наука уже давно является одной из самых важных областей применения статистики и соответственно получения однозначных выводов путем статистики репрезентативного числа испытаний. В планируемом производстве находит применение и второй путь тривалентно-бивалентного перехода — через освобождение процесса от неучитываемых воздействий, так, чтобы он мог совпадать по значениям характеризующих его переменных с заранее установленными эталонами. При этом, как мы увидим, появляется своеобразная связь между установлением такого совпадения, т. е. измерением переменных, характеризующих состояние экономики, измерением переменных, характеризующих ее динамику.

Но дело отнюдь не сводится к формальным аналогиям и констатациям некоторой общности логических схем. История показывает, что физические понятия проникают в социальную и экономическую мысль в те периоды, когда новые завоеванные физикой области начинают воздействовать не только на экономическую и историко-социологическую терминологию, но и на экономическую и социальную жизнь. В XVIII и в XIX вв. в экономической литературе появились термины, явно пришедшие сюда из механики. Перенос терминов соответствовал переносу понятий; может быть, даже отставал от переноса понятий. Такие термины, как «сила», «импульс», «равновесие», были не толь-

ко словами, употреблявшимися в переносном смысле; им соответствовали новые понятия, во многом аналогичные механическим. Но всё это проходило в момент, когда классическая механика оказывала существенное воздействие на развитие производства и социальных форм. Энгельс говорил, что результатом сближения классической науки XVIII в. с практикой была английская общественная революция¹. В тот период, когда Вольтер и энциклопедисты, исходя из духа и содержания ньютоновых «Начал», конструировали новые понятия общественной мысли, в производстве, развитие которого отображала эта мысль, уже применялись практические выводы классической механики.

Перенос в экономическую науку неклассических понятий, впервые примененных в теории физического эксперимента и в квантовой механике, несомненно, связан с математическими методами и возможностями экономического анализа, с переплетением статистических и динамических критериев программирования и с другими тенденциями экономической мысли. Но всё это не закрывает другой, более фундаментальной связи: объект экономической мысли — современное производство — представляет собой в очень большой степени практическое воплощение неклассической физики.

6. Принцип дополнительности, стиль современной физики и ее практическое воплощение

В начале 50-х годов Паули и Борн ввели понятие *стиля* физического мышления; они понимали под этим устойчивые, сохраняющиеся на длительное время особенности физических теорий, позволяющие если не предвидеть дальнейшее развитие теоретической физики, то хотя бы ограничить прогнозы². Принцип дополнительности относится к стилю физического мышления, но характеризует не только существующие физические теории (они достиг-

¹ См.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 1. М., 1955, стр. 608.

² М. Борн. «Proc. Phys. Soc.», 1953, т. 66, 402A, p. 501. Русский перевод: М. Борн. Состояние идей в физике и перспективы их дальнейшего развития. — В сб.: Вопросы причинности в квантовой механике. М., 1955, стр. 102—104.

ли большой логической стройности и завершенности в атомной физике), но и предвидимое будущее — обобщение современных физических теорий при изучении элементарных частиц и при разработке астрофизических и космологических проблем.

Отметим характерное для атомного века соотношение между производством и наукой: развитие производства зависит сейчас не только от конкретных результатов, применимых при конструировании машин и разработке технологических приемов, но и от стиля физического мышления, который обладает специфическим, хотя количественно неопределенным эффектом.

Дело в том, что устойчивыми, длительно сохраняющимися чертами физических теорий являются те наиболее общие допущения о пространстве, времени, движении и веществе, которые конкретизируются в частных теориях, придавая последним единство и преемственность. С тех пор как критерии эмпирической либо логически априорной «очевидности» уступили место критерию принципиальной возможности экспериментальной проверки исходных понятий, последние модифицируются экспериментальными открытиями и вместе с тем служат направляющими вехами эксперимента. Достаточно напомнить о такой исходной идее, как пространственная симметрия элементарных процессов, идее, которая казалась непоколебимой; затем была поколеблена, обобщена и при этом стала направляющей силой дальнейших экспериментов и предваряющих их теоретических догадок и прогнозов. Сейчас понятие стиля приблизилось к понятию фундаментальных постулатов и, таким образом, оказалось связанным с программами *фундаментальных исследований*.

Следует обратить внимание на характерную особенность таких программ. Самый основной и самый бесспорный прогноз, лежащий в их основе и определивший уже сделанные очень большие материальные и интеллектуальные усилия, прямо вытекает из принципа дополнительности. Этот прогноз состоит в связи между фундаментальными открытиями в области элементарных частиц и физикой высоких энергий. Откуда берется уверенность в том, что указанные открытия, в чем бы они ни состояли, будут результатом применения энергий порядка сотен миллиардов электронвольт? Из соотношения неопределенностей импульса и энергии, с одной стороны, и пространственно-

временной локализации, с другой, следует, что во все меньших пространственно-временных областях, где пространственно-временная локализация становится все более определенной, растут возможные значения энергии, поглощаемой и изучаемой в микропроцессах. Убеждение в применимости соотношений неопределенности к ультрамикроскопическим областям вытекает из того обстоятельства, что они не являются ни чисто эмпирическими соотношениями, ни формальной схемой, что они вытекают из фундаментального *физического* принципа — принципа дополнителности.

Принцип дополнителности определяет современный идеал науки. Мы видели, что наука всегда обладала общими идеалами, от которых зависело направление усилий исследовательской мысли.

Идеал перипатетической науки состоял в объяснении явлений с помощью статической схемы «естественных мест», сфер, центра мироздания и его границ. Идеалом классической науки было объяснение явлений взаимодействием дискретных тел, связанных мгновенно распространяющимися силовыми полями. Релятивистская физика видела свой идеал в схеме мировых линий, объясняющих ход всех процессов в природе. Квантовая физика стремилась объяснить движение частиц в атоме характером волновой функции, расшифрованной как вероятность тех или иных состояний движения микрочастиц. Релятивистская квантовая физика хочет объяснить взаимодействия различных полей не только движения частиц, но и их трансмутации и в конце концов различия между типами частиц.

Эти идеалы принимали самые различные формы, они выражались в дифференциальных уравнениях, претендовавших на точное предсказание всей эволюции Вселенной, они выражались в поисках схем, подчиненных законам сохранения и симметрии, в поисках инвариантов все более общих преобразований. Но, во всех случаях каждое конкретное объяснение того или иного факта соотносилось с идеалом науки, стремилось связать конкретное объяснение с поисками общей гармонии бытия, схема которой и была таким идеалом. Подобное стремление и придавало частным теориям общее и неизменное в течение больших периодов черты, которые Паули и Борн называли стилем научной мысли.

Какое воздействие оказывает переход к иной идеальной схеме бытия на направление и интенсивность научного прогресса? Допустим, что в течение некоторого времени скорость, т. е. направление и интенсивность научного прогресса, не менялась под влиянием частных экспериментальных открытий, новых, применимых в частных проблемах математических методов и других внутренних или внешних импульсов. Потом произошел перелом. Эффект изменения идеальной схемы бытия, с которой согласуются поиски частных закономерностей, выразился в изменении установившейся скорости научного прогресса, в его *ускорении*.

Но научный прогресс, даже при установившейся постоянной скорости, оказывает ускоряющее воздействие на технический прогресс. Разумеется, это самое схематичное представление, и оно реализуется лишь статистически. Представим себе, что конструкторы турбогенераторов последовательно создают образцы, в которых достигнуты все более высокие коэффициенты полезного действия. Каковы бы ни были внутренние и внешние импульсы, определяющие темп конструкторской мысли и ее результаты, сама конструкторская мысль состоит в приближении создаваемых моделей к идеальному циклу, определяемому законами термодинамики и электродинамики. Теперь представим себе, что физика низкотемпературной плазмы создала новую идеальную схему — схему превращения тепла в электричество. При неизменных прочих импульсах (это предположение необходимо, если мы хотим иллюстрировать «частную производную», — зависимость технического прогресса от науки) процесс повышения коэффициентов полезного действия в энергетике испытает ускорение.

Скорость технического прогресса в какой-то мере определяет темп возрастания производительности труда и изменение структуры производства — межотраслевых пропорций, изменение, обеспечивающее определенный темп возрастания производительности труда.

Если обозначить через P уровень производительности труда, то темп его возрастания измеряется производной P' от P по времени. Отсюда как-будто следует, что эффект научных исследований, создающих идеальные схемы, определяется ускорением, т. е. второй производной P'' от P по времени, а эффект фундаментальных исследований, приводящих к изменению идеалов и стиля научного твор-

чества, измеряется третьей производной P''' от P по времени. Таким образом, исчезает противоречие между принципиальной неопределенностью результатов фундаментальных исследований и их участием в деятельности человека, подчиняющего себе природу и увеличивающего темп такого подчинения.

Но для подобного вывода необходимы дополнительные условия, которых в прошлые эпохи не существовало. Даже скорость P' возрастания производительности труда могла стать положительной функцией ($P' > 0$) только при определенных социальных и экономических условиях научно-технического прогресса. В XVIII в. после промышленного переворота производство стало прикладным естествознанием в том смысле, что повышение технического уровня производства направлялось физическими и химическими схемами, игравшими роль идеальных циклов, к которым стремились приблизить технологические циклы. К концу XIX в. крупное производство обладало возможностью практически непрерывного изменения технических параметров, приводившего к непрерывному возрастанию производительности общественного труда. Технические преобразования начала нашего столетия — крупные электростанции с дальними передачами, внедрение электрического привода, поточное производство, электроемкие технологические процессы, применение специальных сплавов и легких металлов, повышение скоростей, давлений, напряжений и температур, электрическая тяга, двигатели внутреннего сгорания, автомобильный транспорт, электрическая связь и т. д. — привели к тому, что неравенство $P' > 0$ приобрело экономический смысл. Полное воплощение этого неравенства могло произойти в условиях планового хозяйства; практически непрерывная реконструкция производства как основа практически непрерывного возрастания производительности труда в нашей стране была выполнением плана ГОЭЛРО и последовавших за ним народнохозяйственных планов.

Со стороны физических схем, которые были идеальными канонами технического прогресса, план ГОЭЛРО был планом практического воплощения классической термодинамики, классической электродинамики (электромагнитная индукция как основа генерирования, преобразования и передачи электричества), классической теории электролитической диссоциации (электрохимия), электронной теории

и классической физики в целом. Сейчас мы вошли в новый период технического прогресса, который в наиболее важных направлениях состоит в воплощении неклассической физики. Этот период получил название атомного века, поскольку освобождение ядерной энергии было самым важным применением квантовых и релятивистских концепций. Так же, как электрификация обладала технологическим резонансом (электрохимия, электрометаллургия) и специфическим воздействием на характер труда (автоматизация на основе электрического привода), атомная энергетика и связанный с ней прогресс экспериментальной и теоретической физики привели к новой технологии (электроника) и новому характеру труда (применение счетно-решающих и управляющих механизмов). Для атомного века характерно не только практически непрерывное изменение технических параметров, но и практически непрерывный переход к новым физическим циклам — идеальным канонам, приближение к которым определяет пути технического прогресса и изменение которых означает ускорение технического прогресса и роста производительности труда. В атомном веке экономический смысл приобретает неравенство $P'' > 0$. Фундаментальным экономическим индексом становится выражение, включающее в качестве компонент P , P' и P'' . Это выражение своим максимальным значением определяет оптимальную структуру производства.

Поскольку теоретическая и экспериментальная физика определяет существенную компоненту индекса, служащего целевой функцией при выработке оптимальной структуры производства, экономическая мысль в некоторой (с течением времени растущей!) мере вынуждена учитывать непосредственный эффект применения неклассических концепций.

В свою очередь сама физика вынуждена учитывать в своих прогнозах экономические критерии хотя бы потому, что затраты на фундаментальные физические исследования стали сейчас по своему масштабу сопоставимыми с затратами труда на основные отрасли производства. Отсюда вытекает, что масштабы затрат на фундаментальные исследования должны определяться оптимальной структурой производства, иначе они не дадут максимального эффекта для самой физики.

Такая экономическая компонента физического мышления характерна именно для неклассической физики. Этот

термин «неклассическая» обозначает не только выход за пределы теорий, которые казались раньше такими же неизменными канонами для физической мысли, каким классическое искусство было для нового времени. Неклассическая физика не может стать классической. Она в принципе отказывается от неизменных исходных допущений.

Принцип дополнительности не только был конкретным применением всегда существовавшей диалектики физического познания, он был ее *явным* применением. Дополнительность волнового и корпускулярного аспектов означает, что классические понятия не только получают доступ в микромир, но и приобретают новое обоснование. Существование исторических инвариантов в развитии физики, тот факт, что экспериментально проверенные истины сохраняют свою истинность в пределах применимости, не противоречит эволюции, обобщению, переосмыслению исходных принципов. Дополнительность означает, что схема, описанная с помощью уже известных и установившихся понятий (например, схема мировых линий частиц с точной пространственно-временной локализацией), сочетается с другими определениями, исключающими ее и в то же время неотделимыми от нее, теряющими без нее физический смысл (например, с волновыми свойствами частиц). Насколько можно предвидеть будущее, квантово-релятивистские концепции сделают такое соотношение уже известных схем и противоречащих им определений еще более явным. Отсюда — неизбежное преобразование фундаментальных понятий, отсюда — указанный выше эффект такого преобразования, эффект фундаментальных исследований, выраженный неравенством $P''' > 0$.

Отсюда — экспериментальный характер фундаментальных исследований. До того как Эйнштейн потребовал, чтобы основные представления о пространстве и времени были согласованы с экспериментально обнаруженным постоянством скорости света, до того как Планк ввел представление о квантах, на основе экспериментальных данных о черном излучении, до того как Бор изменил фундаментальное представление об атоме, исходя из спектральных наблюдений, зависимость исходных идеалов науки от экспериментов не была столь явной. Идеальные схемы, к которым стремилась классическая наука, и такие общие представления, как инерция или со-

хранение энергии, только иллюстрировались мысленными (каюта движущегося корабля у Галилея), традиционными (неудачные попытки создания вечного двигателя) или специальными (опыты Джоуля) экспериментами. Сейчас экспериментальный характер фундаментальных принципов стал еще более явным. Мы не знаем, какие принципы будут положены в основу физики элементарных частиц (и тем самым в основу всей физики) в близком будущем. Но мы знаем, что эти принципы смогут быть высказаны с помощью уже известных нам понятий пространственно-временной локализации, энергии и импульса, в качестве дополнительных по отношению к еще неизвестным специфическим (быть может, трансмутационным) представлениям, которые будут открыты физикой высоких энергий и астрофизикой.

Мы знаем также, какие именно эксперименты и наблюдения обещают привести к таким представлениям, знаем, как будут воздействовать результаты указанных экспериментов и наблюдений на экономические показатели — целевые функции оптимизации народнохозяйственных пропорций. Но не об этом эффекте сейчас идет речь. Современная экспериментальная физика еще не дает возможности с большой частотой изменять стиль и идеалы науки, переходить от понятия непрерывного (ограниченного в своей непрерывности принципом неопределенности и дополнительностью волнового и корпускулярного аспектов) движения тождественных себе частиц к иным фундаментальным понятиям. Сейчас мы пользуемся относительно неизменными идеалами научного объяснения, релятивистскими и квантовыми идеалами, неклассическими канонами физического мышления, созданными в первой четверти века. Приближение науки к этим идеалам дало такие результаты, как модель атома, модель ядра, расшифровка дефекта массы, современная картина (еще неоднозначная классификация) элементарных частиц, теория энергетического баланса звезд и многое другое. Приближение к неклассическим идеалам физического объяснения привело к некоторым схемам, играющим роль идеальных циклов, к которым стремится производственная техника. Некоторые из этих идеальных схем уже стали техническими (с известным приближением к идеальным параметрам). Наиболее важный пример — техническое освоение деления урана. Другие

схемы еще не получили технического воплощения в производстве (управляемый синтез легких ядер). Достигнутый во второй четверти века в СССР уровень развития промышленности и другие экономические, социальные и культурные условия, созданные к середине столетия, позволили в течение 50-х и 60-х годов прийти к почти непрерывному воплощению в практику неклассических схем атомной физики в некоторых отраслях (атомная энергетика, электроника, кибернетика) и соответственно к некоторому практически непрерывному ускорению роста производительности труда во всем производстве ($P'' > 0$). Этот результат, связанный с воплощением неклассической физики, приблизил экономику к неклассическим соотношениям между определением *состояния* и определением *динамики*.

Вернемся к введенным в предыдущей главе понятиям n -мерного пространства и $(n+1)$ -мерной кривой динамики состояний. Представим себе n планируемых отраслей производства, и объем производства в каждой из этих отраслей будем считать координатой точки в n -мерном пространстве абсолютных (т. е. описывающих не только отношения, но и абсолютные, выраженные в общих единицах объемы) структур. Каждая точка в этом пространстве соответствует определенной структуре. Задача состоит в определении точки, изображающей оптимальную структуру, оптимальное распределение общественного труда и фондов между отраслями.

Вторая задача — определение оптимальной динамики, оптимального изменения структуры в течение планируемого периода. Она состоит в определении некоторой кривой в $(n+1)$ -мерном (структура и время) пространстве — «мировой линии» производства.

Решение первой задачи уже включает в некоторой мере и решение второй задачи, поскольку оно основано на максимальном значении целевой функции, включающей не только производительность труда, но и ее производные по времени. Последние устанавливаются прогнозом: нужно выяснить, какая динамика дальнейшего развития определяется каждым вариантом структуры, какая эвентуальная «мировая линия» соответствует каждой из сравниваемых структур.

Таким образом, для оптимизации динамической (основанной на индексе, включающем производные по времени)

структуры необходимы дополнительные данные: соотношение отраслей в данный момент (положение в n -пространстве) и эвентуальное, прогнозируемое направление «мировой линии» в $(n+1)$ -пространстве. Некоторые чисто экономические соображения приводят к выводу о соотношении неопределенности этих дополнительных экономических характеристик.

Представим себе, что оптимизация структуры устанавливает ее с очень большой точностью. Такая точность межотраслевых пропорций гарантируется строгим *соблюдением* технологических нормативов (скоростей, напряжений, давлений, температур, состава шихты, удельных расходов сырья, энергии и т. п.). Она позволяет точно рассчитать необходимые поставки сырья, орудий труда и энергии для каждой отрасли и ассортимент продукции, выпускаемой этой отраслью. В идеале, однозначным образом определяются все переменные, фигурирующие в экономических расчетах.

Теперь представим себе, что для того же момента точно определена эвентуальная «мировая линия» — оптимальная динамика структуры. Она гарантируется переходом к новым параметрам, к новым технологическим нормативам, *внедрением* новых конструкций и новой технологии.

Нетрудно видеть, что неограниченная точность определения структуры и неограниченная точность определения динамики несовместимы, а неточности определения находятся в обратной зависимости одна от другой. Внедрение новой технологии и новых конструкций изменяет структуру производства, и такое изменение нельзя определить при точном определении структуры, исходящем из строгого соблюдения параметров, применение которых известно, не требует проверки в новых областях, проверки производственной, в больших масштабах, учитывающей технико-экономические и экономические результаты применения, выбора по экономическим показателям одной из различных, конкурирующих конструкций, одного из конкурирующих технологических рецептов. Если план весьма точно определяет структуру, то изменение ее должно происходить без столь же точного планирования технических сдвигов. Прогноз этих сдвигов проверяется инициативой предприятий, выбирающих тот или иной более рациональный при точно определенной структуре, новый технологический процесс или новое, более рациональное

при заданной структуре, при заданном объеме и ассортименте продукции, оборудование. В свою очередь точные плановые наброски динамики структуры и соответственно внедрения новой техники могут реализоваться при некоторых допущениях в части соблюдения нормативов, поисков и инициативы, в части изменения ассортимента продукции и в части поставщиков и поставляемых материалов, иначе говоря, при структурных допущениях. По-видимому, крайние случаи так же невозможны в экономике, как в физике практически невозможно точное определение координат за счет полной неопределенности импульса и, наоборот, точное определение импульса за счет полной неопределенности положения частицы.

Эти замечания не претендуют на какое-либо существенное значение для экономического анализа эффекта технического и научного прогресса. Для этого они должны быть изложены более подробно, систематически и строго. Здесь экономические соображения приведены только для того, чтобы показать принципиальную возможность распространения вне физики неклассических понятий дополненности и неопределенности, аналогичного давнему распространению классических понятий силы, импульса и равновесия.

7. Дополненность и информация

Принципиальная возможность обобщения понятия дополненности и его применения вне квантовой физики иллюстрировалась выше схемой тривалентно-бивалентных переходов. При этом мы очень близко подошли к теории информации. Если под информацией понимать однозначные сведения о событиях или о вероятности событий, то переход от второй информации к первой и будет $(W \rightarrow R)$ -переходом. Но этого мало. Теория информации за два десятилетия своего существования стала учением не только о логико-математических операциях, но и о реальных физических ситуациях, гарантирующих ту или иную возможность получения данных об объективных процессах. Этот онтологический, физический характер теории информации стал особенно ярким после того, как некоторые основные понятия указанной теории были сопоставлены с чисто физическими понятиями термодинамики и стали их обобщенными эквивалентами.

Наибольшее значение имело определение меры информации как степени неопределенности, которая была преодолена этой информацией. Мера неопределенности в термодинамике — это *энтропия*, неупорядоченность, отсутствие макроскопических различий в некоторой системе, в большом множестве молекул. Если в рассматриваемом множестве средняя скорость молекул (индивидуальное их поведение игнорируется, и рассматривается только усредненная величина, средняя скорость) распределена равномерно и отсутствуют температурные перепады, энтропия достигает максимума, и тепловая энергия уже не может быть превращена в механическую энергию. Степень макроскопической упорядоченности, температурные перепады, эффекты макроскопических воздействий измеряются той же величиной с противоположным знаком. Леон Бриллюэн назвал ее *негэнтропией* и определил информацию (имеющую своим содержанием состояния физической системы) как уменьшение энтропии и возрастание негэнтропии. Бриллюэн сформулировал «негэнтропийный принцип информации», который представляет собой обобщение второго начала термодинамики. Согласно этому принципу, энтропия (мера недостатка информации о физической системе) всегда увеличивается при эксперименте, расширяющем информацию о ней. Иначе говоря, возрастание негэнтропии оплачивается неотделимым от него возрастанием энтропии¹.

Этот принцип, по мнению Бриллюэна, не зависит от принципа Гейзенберга, от соотношения неопределенностей квантовой механики. Действительно, возрастание энтропии как недостатка информации при возрастании негэнтропии, как меры увеличения информации, характерно не только для частиц с существенным корпускулярно-волновым дуализмом. Однако негэнтропийный принцип теснейшим образом связан с более общим понятием дополненности, по отношению к которому дополненность

¹ Сравнительно доступное изложение основных понятий теории информации дано в книге Бриллюэна «Наука и теория информации» (М., 1960). Краткое и весьма содержательное введение в теорию информации дано А. Я. Хинчиным в статье «Понятие энтропии в теории вероятностей» («Успехи математических наук», 1953, т. 8, стр. 3—20). Из позднейших изданий, рассчитанных на широкие круги, укажем: С. Гольдман. Теория информации. М., 1960; А. М. Яглом и И. Я. Яглом. Вероятность и информация. М., 1960.

волнового и корпускулярного аспектов и неопределенность сопряженных динамических переменных являются частной модификацией.

Такое более общее понятие дополнительности, как мы видели, связывает между собой макроскопический и микроскопический аспекты бытия, отрицающих один другой и вместе с тем лишенных один без другого физической содержательности.

Требование физической содержательности — один из основных пунктов теории информации. Переходы от так называемой *свободной информации* о чисто абстрактных случаях, без определенного физического смысла, к *связанной информации* (о микросостояниях физических систем) ¹ — это переход к физически содержательной информации, которая может быть проверена экспериментом. Такой переход позволяет расшифровать в онтологическом смысле требование Бора: «под явлением мы подразумеваем нечто допускающее информацию», требование, которое, по мнению Бора, делает квантовую механику непротиворечивой в пределах бивалентной логики. В сущности переход к связанной информации — это обратный переход по сравнению с переосмыслением понятия «явление» у Бора. В одном случае требуют, чтобы явление допускало информацию, в другом, — чтобы информация была информацией о физическом явлении. Эти два требования означают одно и то же — физическую содержательность информации. Они и позволяют отождествить логико-математическое понятие информации с физическими понятиями энтропии и негэнтропии.

Физически содержательная информация — это информация о свойствах тождественных себе объектов. Их тождественность гарантируется некоторым непрерывно действующим законом, определяющим макроскопическое пространственно-временное поведение объекта, и это поведение отличается от пространственно-временных геометрических образов микроскопическим заполнением каркаса мировых линий. Информация, позволяющая говорить об объекте как о тождественном себе, должна включать пространственно-временные характеристики, которые дают возможность судить о будущем поведении физического объекта. Такая информация основана на существовании макроско-

¹ См.: Бриллюэн. Наука и теория информации, стр. 200—201.

ических перепадов типа разности температуры, гравитационных, магнитных или электрических потенциалов, она указывает на макроскопические закономерности, определяющие будущее поведение объекта. В этом смысле информация о тождественных себе, собственно физических объектах должна быть *прогнозной информацией*. После того как появилась классическая термодинамика, стало известно, что подобная, определяющая будущее прогнозная информация не должна, как это думал Лаплас, включать данные о положении и скорости всех молекул, составляющих Вселенную. Она должна быть негэнтропийной информацией, информацией о макроскопических перепадах. Впрочем, сейчас мы знаем, что и лапласова информация была бы лишена физического смысла: положение и скорость молекул имеют смысл при наличии макроскопических тел отсчета и, следовательно, при макроскопической упорядоченности бытия, при некоторой негэнтропии.

Но мы знаем сейчас и другое. Негэнтропия мира, макроскопическая упорядоченность бытия, существование макроскопических тел (т. е. единообразно движущихся скоплений молекул) не имеют физического смысла без микроскопического «бунта» против микроскопической закономерности. Иными словами, негэнтропия мира невозможна без энтропии, без неупорядоченности, которая возрастает при каждом акте, увеличивающем макроскопическую упорядоченность. Разъясняя физический смысл «негэнтропийного принципа информации», мы неизбежно приходим к дополнительности макроскопического и микроскопического аспектов.

При этом мы получаем возможность представить в качестве конкретных концепций информации уже рассмотренные модификации общего понятия дополнительности в квантовой механике, в классической физике с ее историческими прообразами, в релятивистских квантовых концепциях, в космологии и вне физики — в экономических категориях.

В квантовой механике дело идет именно о получении однозначной *прогнозной информации*. Прохождение электрона сквозь очень узкое отверстие в диафрагме, т. е. «координатный» эксперимент, не гарантирует результатов следующих экспериментов для того же электрона, он не гарантирует, что электрон пройдет через заранее заданное своим положением отверстие в следующей диафрагме. Не

гарантирует, потому что указанный «координатный» эксперимент изменяет в неконтролируемой мере импульс электрона. Если себестоимость электрона гарантируется возможностью заранее определить его поведение, то такую гарантию могло бы дать сколь угодно точное определение характеристики, охватывающей и положение электрона, и его импульс. Такой характеристикой служит одновременно определенные мера изменения положения электрона — пройденное им расстояние между двумя «координатными» экспериментами — и его импульс при каждом эксперименте. Такой характеристикой служит *действие*. Если бы мы могли определить с какой угодно точностью *действие* электрона, мы получили бы полную прогнозную информацию о его поведении. Это невозможно ввиду дискретности действия. Но именно дискретность действия, которая выражается в неконтролируемом изменении другой сопряженной переменной при определении данной — в изменении импульса при определении положения и, наоборот, в изменении положения при определении импульса — гарантирует существование субъекта поведения, субъекта изменений, гарантирует физический характер процесса.

Физическое понятие импульса соответствует обобщенному «информационному» понятию негэнтропии. Частица приобретает макроскопический (измеримый с помощью макроскопического прибора) импульс в случае разности потенциалов или другой макроскопической диссимметрии, неравномерности, упорядоченности — конкретных физических форм негэнтропии. Но физическое существование частицы, несводимое к ее движению, скорости, ускорению, — вообще к ее поведению, существование *субъекта* поведения выражается в отличии частицы — физической точки — от геометрической точки, в массе, заряде и других корпускулярных свойствах.

«Субъектное» существование выражается, как это уже понял Эпикур, в ультрамикроскопических процессах, не подчиненных макроскопическим закономерностям. У Эпикура такими процессами были *clinamen*, неподвластные макроскопической анизотропии пространства. В классической термодинамике тепловые потоки определяются температурными перепадами, но само понятие температуры теряет смысл без «субъекта движения», без средней скорости индивидуально нерегистрируемых, энтропийных смещений молекул. В космологии негэнтропийное воздействие

локальных полей, быть может, дополняется энтропийным воздействием метagalактического поля.

При подобном предположении и при сближении дополнительных понятий негэнтропии и диссимметрии, с одной стороны, и энтропии и симметрии — с другой, можно представить в информационном аспекте зависимость массы частицы от ее скорости. Макроскопическая скорость зависит от преодоления статистического разброса элементарных сдвигов, от преодоленной энтропии. Каждое новое диссимметризирующее воздействие локального поля должно преодолеть не только исходную энтропию частицы, но и ту энтропию, которая была уже преодолена предшествующим диссимметризирующим воздействием. Эта уже преодоленная энтропия равна преодолевшей ее негэнтропии, пропорциональна уже достигнутой скорости и проявляется как зависящая от скорости масса частицы¹.

Перейдем к дополнительности негэнтропии и энтропии вне физики. Такой переход может продемонстрировать не тавтологичность логико-информационных псевдонимов физических понятий.

Два типа тривалентно-бивалентных переходов — переход к большому, статистически репрезентативному числу испытаний и одиночный эксперимент, дающий точное определение одной переменной, — можно представить в информационном аспекте следующим образом. Первый путь соответствует термодинамической негэнтропии, второй — квантовой. Оба не дают абсолютно точной прогнозной информации. В первом случае она ограничена неопределенностью в малых областях, где встречаются статистические флуктуации и отход от негэнтропии. Во втором случае создаваемая прибором негэнтропия вызывает энтропийный разброс значений другой сопряженной переменной.

При обобщенном понимании негэнтропии и энтропии яснее видны связь и некоторый изоморфизм науки и производства. Всякое производство (включая и то, что обычно называют производством энергии) является производством негэнтропии. Таким оно представляется, если иметь в виду цели производственной деятельности, начиная с ее генезиса. Добывание и поддерживание огня в первобытной пещере компенсировали рассеяние тепла человеческим организмом и та же задача — компенсация возрастания энтро-

¹ См. Б. Г. Кузнецов. Этюды об Эйнштейне. М., 1965, стр. 369—372; «Philosophy of Science», 1966, т. 33, N 3, p. 206—208.

пии — служит и сейчас целью отопления жилищ¹. Но и вне топливно-энергетических отраслей производство со стороны целей труда остается производством негэнтропии. Оно всегда направлено к макроскопической упорядоченности, вызывающей тот или иной макроскопический эффект. Примером может служить упорядоченная ориентация волокон при производстве ткани из беспорядочно ориентированных волокон хлопка или шерсти до прядения. Иногда термин «макроскопическая упорядоченность» становится условным: в химических производствах и в металлургии речь может идти об упорядоченных кристаллических решетках. Возвращаясь к энергетике, отметим, что целью производства может служить и пространственная концентрация перепада (сооружение плотины), создание разности температур, давлений пара, электрических потенциалов (электростанции).

Такое определение — производство негэнтропии — не является достаточным без дополнительного определения. Если рассматривать производство со стороны эксплуатационной, со стороны использования перепадов, то производственные процессы являются производством энтропии. Прохождение воды через турбину уменьшает уровень водохранилища, и этот процесс может уравновесить возрастание негэнтропии и даже уменьшить перепад. Прохождение пара через турбину уменьшает разность давлений. Ток выравнивает разность потенциалов. Каждое возрастание негэнтропии сопровождается превышающим ее рассеянием энергии.

В этих примерах речь идет либо об энтропии и негэнтропии в прямом, термодинамическом смысле, либо о близких к этому смыслу физических модификациях указанных понятий. Но при динамическом анализе производства (т. е. при учете изменяющейся техники и соответственно изменяющейся структуры) производство представляется производством негэнтропии в обобщенном смысле, *производством информации*, причем во все возрастающей степени.

Труд человека — целесообразная деятельность и существование идеального прообраза — отличает самого плохого архитектора от самой лучшей пчелы, которая превосхо-

¹ См. статью Роберта Эмдена «Почему мы топим зимой?» в «Nature», 1938, т. 141, р. 908. См. также: А. Зоммерфельд. Термодинамика и статистическая физика. М., 1955, стр. 59—60; Б. Г. Кузнецов. Принципы классической физики М., 1958, стр. 164—165.

дит его аккуратным изготовлением сот. Это замечание Маркса — основа определения труда¹. В свете этого определения труд является реализацией идеальной схемы. Соты, изготовленные пчелой, увеличивают негэнтропию (упорядоченная компоновка частиц воска), но не являются продуктом труда. Труд реализует заранее намеченную идеальную схему, и условием его является прогнозная информация об этой схеме, существование каких-то первоначально качественных, затем количественных канонов, которые сами могут с течением времени изменяться.

Эти каноны, оставаясь эмпирическими, являются содержанием технической информации, хранящейся в памяти участников производства, затем хранение информации становится функцией обособившейся группы, далее, информация о традиционных производственных канонах становится частью письменности. Очень медленно, незаметно для каждого поколения, меняются идеальные каноны. Наконец появляются идеальные схемы, к которым должны приближаться сами каноны, эволюция последних становится быстрой, она стремится к идеальным схемам, вытекающим из открытых и систематизированных закономерностей природы. Традиция уступает место науке. В самой науке непосредственным импульсом становится приближение к тем идеалам научного объяснения, о которых уже шла речь.

Мы обнаруживаем иерархию импульсов, толкающих вперед науку и производство: «перепад», отделяющий ограниченные силы человека от появившейся в его сознании целесообразной компоновки сил природы; «перепад», отделяющий технику от идеальных схем, к которым пришла наука; «перепад» между этими схемами и тем, что обещают фундаментальные исследования.

Негэнтропия в чисто информационном смысле становится не только исходным условием производства, но и его результатом. Эта информация о новых технических параметрах, о новых еще не воплотившихся в инженерные схемы физических циклах, о новых принципах, ускоряющих поиски таких циклов, становится существенным условием производства. Такая информация оказывает ускоряющее воздействие на темп технической реконструкции. Вместе с тем «производство информации», разработка новых тех-

¹ См.: К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 23. М., 1960, стр. 188—189.

нических параметров, разработка новых физических схем и фундаментальные исследования входят как все более существенная часть в баланс народного хозяйства, определяя структуру, распределение общественного труда между отраслями. Но «производство информации» обеспечивает уже не сохранение установившейся структуры, а ее изменение, ее оптимальную «мировую линию», оптимальную кривую в $(n + 1)$ -мерном пространстве структур n отраслей и времени. В этом смысле «производство информации» — это производство *динамической стоимости*.

Содержание

1. Дополнительность в перелятивистской квантовой механике	3
2. Классическая предыстория понятия до- полнительности	16
3. Относительность, дополнительность, бы- тие	32
4. Космос и микрокосм	48
5. Логические аспекты принципа дополни- тельности	61
6. Принцип дополнительности, стиль со- временной физики и ее практическое воплощение	69
7. Дополнительность и информация . . .	79

Борис Григорьевич Кузнецов

Принцип дополнительности

*Утверждено к печати редколлегией научно-популярной
литературы Академии наук СССР*

Редактор С. И. Ларин

Редактор издательства Е. М. Клаус

Художник В. Г. Прохоров

Технический редактор Л. В. Каскова

Сдано в набор 2/III-1968 г. Подп. к печ. 28/VI-1968 г.

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага № 1. Усл. печ. л. 4,62. Уч.-изд. л. 4,6. Тираж 30.000

Тип. зак. 414. Т-08836

Цена 23 коп.

Издательство «Наука». Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука», Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

